



TUGAS AKHIR TF 145565

PERANCANGAN DESAIN BOILER PADA MINI PLANT STEAM ENGINE UNTUK PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA UAP

**KARTIKA RAHMAWATI
NRP 10511500000054**

**Dosen Pembimbing
Dr. Imam Abadi, S.T., MT
NIP. 19761006 199903 1 002**

**Herry Sufyan Hadi, S.T., MT
NIP. 1988201711056**

**PROGRAM STUDI DIII TEKNOLOGI INSTRUMENTASI
DEPARTEMEN TEKNIK INSTRUMENTASI
FAKULTAS VOKASI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2018**



TUGAS AKHIR TF 145565

PERANCANGAN DESAIN BOILER PADA MINI PLANT STEAM ENGINE UNTUK PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA UAP

**KARTIKA RAHMAWATI
NRP 1051150000054**

**Dosen Pembimbing
Dr. Imam Abadi, ST., MT
NIP. 19761006 199903 1 002**

**Herry Sufyan Hadi, S.T., MT
NPP. 1988201711056**

**PROGRAM STUDI DIII TEKNOLOGI INSTRUMENTASI
DEPARTEMEN TEKNIK INSTRUMENTASI
FAKULTAS VOKASI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2018**



FINAL PROJECT - TF 145565

***DESIGN BOILER ON MINI PLANT STEAM
ENGINE FOR STEAM POWER PLANT***

**Kartika Rahmawati
NRP 10511500000054**

Advisor Lecturer
Dr. Imam Abadi, ST., MT
NIP. 19761006 199903 1 002

Herry Sufyan Hadi, S.T., MT
NPP. 1988201711056

STUDY PROGRAM OF DIII INSTRUMENTATION TECHNOLOGY
DEPARTMENT OF INSTRUMENTATION ENGINEERING
FACULTY OF VOCATION
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2018

**PERANCANGAN DESAIN BOILER PADA MINI PLANT
STEAM ENGINE UNTUK PEMBANGKIT LISTRIK
TENAGA UAP**

TUGAS AKHIR

Oleh :

KARTIKA RAHMAWATI
NRP. 10511500000054

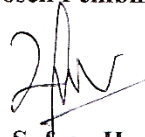
Surabaya, 31 Juli 2018
Mengetahui / Menyetujui

Dosen Pembimbing I



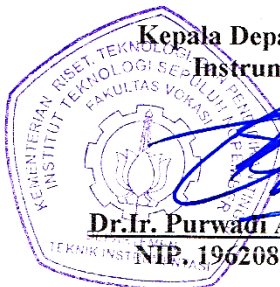

Dr. Imam Abadi, ST., MT
NIP. 19761006 199903 1 002

Dosen Pembimbing II



Herry Sufyan Hadi, S.T., M.T
NPP. 19882017111056

**Kepala Departemen Teknik
Instrumentasi ITS**



Dr. Ir. Purwadi Agus Darwito, M.Sc
NIP. 19620822 198803 1 001

**PERANCANGAN DESAIN BOILER PADA MINI PLANT
STEAM ENGINE UNTUK PEMBANGKIT LISTRIK
TENAGA UAP**




TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Ahli Madya
pada
Program Studi DIII Teknologi Instrumentasi
Departemen Teknik Instrumentasi
Fakultas Vokasi
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

KARTIKA RAHMAWATI
NRP. 10511500000054

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Dr. Imam Abadi, ST., MT.....  (Pembimbing I)
2. Herry Sufyan Hadi, S.T., M.T.....  (Pembimbing II)
3. Dr.Ir. Totok Soehartanto, DEA.....  (Penguji I)

SURABAYA
JULI 2018

PERANCANGAN DESAIN BOILER PADA MINI PLANT STEAM ENGINE UNTUK PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA UAP

Nama : Kartika Rahmawati
NRP : 10511500000054
Jurusan : D3 Teknik Instrumentasi
Pembimbing : Dr. Imam Abadi, ST., MT
Herry Sufyan Hadi, S.T., M.T

Abstrak

Ketel uap (boiler) adalah suatu bejana tertutup yang terbuat dari baja yang digunakan untuk menghasilkan uap panas. Pada era saat ini sudah banyak unit – unit pembangkit listrik tenaga uap yang menggunakan boiler sebagai penghasil uap yang nantinya akan digunakan untuk menghasilkan listrik.

Untuk membantu memenuhi kebutuhan listrik yang kian hari kian meningkat, di buat sebuah prototype boiler dengan tipe water tube boiler yang dapat membantu para mahasiswa nantinya dapat mengerti proses pembangkit tenaga listrik yang dibuat dalam bentuk prototype. Perencanaan boiler ini berskala kecil dengan kapasitas uap keluaran 20 kg/jam dan dirancang menggunakan bahan bakar LPG sebagai sumber energi panas.

Dari hasil perencanaan water tube boiler ini menghasilkan uap keluaran dengan temperatur sekitar 120-150°C dan tekanan 1,5-2 bar. Efisiensi ketel sebesar 0,654 %. Badan ketel menggunakan lempengan besi dengan tinggi perancangan badan 75cm dan diameter 50cm. Penggunaan bahan besi sebagai badan ketel sudah diperhitungkan dapat menahan tekanan 4 bar dan suhu diatas 200°C dari hasil ruang bakar. Sedangkan untuk bahan pipa sendiri menggunakan Stainless Steel Boiler Tubing.

Kata kunci : Ketel uap, Tekanan, Bahan bakar, Temperatur

DESIGN BOILER ON MINI PLANT STEAM ENGINE FOR STEAM POWER PLANT

Name : Kartika Rahmawati

NRP : 10511500000054

Departement : Diploma of Instrumentation Engineering

Advisor Lecturer : Dr. Imam Abadi, ST., MT

Herry Sufyan Hadi, S.T., M.T

Abstract

The boiler is a closed vessel made of steel used to produce steam. In the current era there are many steam power plant units that use boilers as a steam producer which will be used to generate electricity.

To help meet the increasingly increasing demand for electricity, a boiler prototype with water tube boiler type that can help students can understand the power generation process created in the form of prototype. The planning of this boiler is small scale with a vapor capacity of 20 kg / hr and is designed using LPG as a source of heat energy.

From the results of this boiler water tube planning to produce steam output with a temperature of about 120-150 °C and pressure of 1.5-2 bar. The boiler efficiency is 0.654%. Kettle body using iron plate with height 75cm body design and 50cm diameter. The use of iron as a boiler has been calculated to withstand the pressure of 4 bar and temperature above 200 °C from the combustion chamber. As for the pipe material itself using Stainless Steel Boiler Tubing

Keywords: Boiler, Pressure, Fuel, Temperature

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Allah SWT atas rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir dengan judul “PERANCANGAN DESAIN BOILER PADA MINI PLANT STEAM ENGINE UNTUK PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA UAP “ tepat pada waktunya.

Terselesaikannya laporan ini juga tak luput dari dukungan dan peran serta dari orangtua dan keluarga besar serta berbagai pihak. Untuk itulah dalam kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada :

1. Bapak Dr. Ir.Purwadi Agus Darwito,M.Sc selaku Kepala Departemen D3 Teknik Instrumentasi ITS yang telah memberikan semangat dan motivasi kepada kami
2. Bapak Dr. Imam Abadi, ST., MT selaku dosen pembimbing yang telah meluangkan waktu, arahan dan saran yang membantu selama proses pengerjaan tugas akhir
3. Bapak Herry Sufyan Hadi, S.T., M.T selaku dosen pembimbing 2 yang telah meluangkan waktu, arahan dan saran yang membantu selama proses pengerjaan tugas akhir
4. Papa dan Mama tercinta yang telah memberikan segala dukungan baik moral maupun materil serta dukungan yang sangat luar biasa berupa doa.
5. Terimakasih kepada Teman Sekelompok Tugas Akhir Novi, Naqiya, Dresta, Khoim, Ronggo yang bersama-sama berjuang dalam pengerjaan tugas akhir ini
6. Terimakasih kepada Shaski, Widuri, dan Atak teman satu perjuangan penulis selama berkuliah di ITS 3 tahun ini.
7. Bapak Subandi selaku pemilik bengkel yang sudah sangat membantu dan memberikan banyak pengetahuan tentang ilmu mekanik dan membantu dalam pembuatan alat.
8. Teman-teman D3 Teknik Instrumentasi angkatan 2015 Fakultas Vokasi ITS.
9. Teman – teman F50 yang tercinta.
10. Serta semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu.

Penulis menyadari bahwa kesempurnaan hanya milik Allah SWT. Oleh sebab itu, penulis sangat berterimakasih atas segala masukan, kritik dan saran yang membangun dari pembaca agar laporan ini menjadi lebih baik untuk di kemudian hari. Demikian laporan ini penulis buat, semoga laporan ini dapat memberikan manfaat selain bagi penulis sendiri, dan bagi pembaca sekalian.

Surabaya, 19 Juli 2018

Penulis

Kartika Rahmawati

NRP. 10511500000054

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	ii
LEMBAR PENGESAHAN I	iii
LEMBAR PENGESAHAN II	iv
ABSTRAK	v
ABSTRACT	vi
KATA PENGANTAR	vii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xii

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan	2
1.4 Batasan Masalah	3
1.5 Manfaat	3

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Definisi <i>Boiler</i>	5
2.2 Klasifikasi Ketel Uap	6
2.2.1 Menurut Isi Pipanya	6
2.2.2 Menurut Posisi Dapur (<i>Furnace</i>)	9
2.2.3 Menurut Penggunaan	9
2.2.4 Berdasarkan Tekanan Kerja	9
2.3 Bagian-bagian Ketel Uap	10
2.4 Perpindahan Panas	12
2.4.1 Konduksi	13
2.4.2 Konveksi	14
2.4.2.1 Konveksi Pada Pipa	16
2.4.3 Radiasi	19
2.5 Koefisien Perpindahan Panas Keseluruhan	21
2.6 Efisiensi Boiler	23
2.7 Penelitian Sebelumnya	24
2.7.1 Perancangan Boiler Fire Tube Pabrik Tahu	24
2.7.2 Perancangan Boiler Fire Tube Pabrik Tahu	25

2.7.3 Perancangan Boiler Water Tube Pabrik Tahu25

BAB III METODOLOGI PERCOBAAN

3.1 Alat dan Bahan.....	27
3.2 Metode Perancangan.....	27
3.3 Penjelasan Diagram Alir Proses Pembuatan	29
3.3.1 Tinjauan Pustaka	29
3.3.2 Pengambilan Data Properti	29
3.3.3 Perencanaan dan Perhitungan.....	29
3.3.4 Pembuatan Desain Perancangan.....	29
3.3.5 Penyusunan Laporan.....	29
3.4 Penjelasan Diagram Alir Perhitungan Perencanaan.....	31
3.4.1 Pengambilan Data Properti.....	31
3.4.2 Perhitungan Data Properti, Qboiler, mflue gas	32
3.4.3 Perhitungan Perpindahan Panas dan Dimensi.....	34
3.4.4 Pemilihan Jenis Pipa	36
3.4.5 Penggambaran Perencanaan	36

BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

4.1 Desain Boiler	43
4.2 Perhitungan Perpindahan Panas.....	45
4.2.1 Perhitungan Kalor	45
4.2.2 Perhitungan Bahan Bakar Boiler.....	46
4.2.3 Pemilihan Jenis Pipa.....	48
4.2.4 Perhitungan Air Mengalir Didalam Pipa	36
4.2.5 Perhitungan Udara Mengalir Diluar Pipa.....	37
4.2.1 Konduksi Yang Terjadi Pada Pipa	39
4.2.1 Koefisien Perpindahan Panas	39
4.2.1 Dimensi Panjang Pipa	39
4.2.1 Efisiensi <i>Water Tube Boiler</i>	40
4.3 <i>Instrument</i> Penunjang <i>Boiler</i>	53
4.4 Prinsip Kerja <i>Water Tube Boiler</i>	57
4.5 Hasil Performansi Perancangan Boiler	58
4.6 Pembahasan.....	64

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan.....67

5.2 Saran.....68

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

BIODATA PENULIS

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Bagan Ketel Pipa Api	7
Gambar 2.2 Bagan Ketel Pipa Air	8
Gambar 2.3 Bagian Bagian <i>Boiler</i>	10
Gambar 2.4 Perpindahan Panas Konveksi, Konduksi dan Radiasi	13
Gambar 2.5 Pertumbuhan Lapisan Batas Pada Perpindahan Panas Konveksi	14
Gambar 2.6 Pertukaran Radiasi antara Permukaan dengan Sekelilingnya	20
Gambar 3.1 Diagram Alir Pembuatan <i>Water Tube Boiler</i>	28
Gambar 3.2 Diagram Alir Perhitungan dan Perencanaan	30
Gambar 3.3 Desain 2D Water Tube Boiler Atas	38
Gambar 3.4 Desain 2D Water Tube Boiler Depan	39
Gambar 3.5 Desain 3D Water Tube Boiler Depan	40
Gambar 3.6 Desain 3D Water Tube Boiler Atas	41
Gambar 4.1 <i>Boiler</i> Pada <i>Mini Plant Steam Engine</i>	43
Gambar 4.2 <i>Level Glass</i>	54
Gambar 4.3 <i>Pressure Gauge</i>	55
Gambar 4.4 <i>Manual Valve</i>	56
Gambar 4.5 <i>Thermocouple Type K</i>	57
Gambar 4.5 Grafik Perbandingan Tekanan Desain dan Uji	62
Gambar 4.5 Grafik Perbandingan Temperatur antara Desain dan Uji	63

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Harga Tipikal dari Koefisien Perpindahan Panas Konveksi	16
Tabel 2.2 Harga Representasi <i>fouling factor</i>	23
Tabel 2.3 Harga Representasi Koefisien Perpindahan Panas Keseluruhan (Incropera)	23
Tabel 4.1 Tabel Persamaan Konstanta.....	50
Tabel 4.2 Tabel Data Kalor Pembakaran.....	58
Tabel 4.3 Tabel Data Input	59
Tabel 4.4 Tabel Data Output	60
Tabel 4.5 Tabel Data Perbandingan Pressure.....	61
Tabel 4.6 Tabel Data Uji Performa Temperatur	62

DAFTAR NOTASI

q''	: fluks panas konveksi (W/m^2)
T_s	: temperatur permukaan padat (K)
T_∞	: temperatur rata – rata fluida (K)
h	: koefisien perpindahan panas konveksi (disebut juga konduktansi film/lapisan fluida [W/m^2K])
$T_{m,i}$: Temperatur fluida masuk
$T_{m,o}$: Temperatur fluida keluar
Pr	: Bilangan Prandalt
Q	: Kalor (kJ/kg)
h_o	: Koefisien perpindahan panas udara diluar ruangan
h_i	: Koefisien perpindahan panas udara didalam ruang
h	: enthalpy (kJ/kg)
Nu	: Bilangan Nusselt
W	: Daya Turbin
ms	: Kapasitas steam yang masuk kedalam turbin
h_{in}	: Nilai enthalpy yang masuk kedalam turbin
h_{out}	: Nilai enthalpy yang keluar dari turbin.
$\dot{m}_{flue\ gas}$: massa gas yang di butuhkan oleh boiler
$Q_{flue\ gas}$: Kalor yang dihasilkan oleh flue gas
C_p	: Panas jenis pada tekanan tetap
π	: radial
Di	: diameter dalam pipa
μ	: koefisien gesek
Do	: diameter luar pipa
r_i	: jari – jari dalam tubing
k	: koefisien material
r_o	: jari – jari luar tubing
T_{hi}	: jari – jari dalam tubing
T_{co}	: Konduksi pada pipa
T_{ho}	: jari – jari luar tubing
T_{ci}	: koefisien perpindahan panas di dalam pipa
ΔT_{lm}	: perbedaan logaritmis temperatur rata - rata

U	: koefisien perpindahan panas
Di	: diameter dalam pipa
π	: radial
ΔT_{lm}	: perbedaan logaritmis temperatur rata – rata
LHV	: <i>Low Heating Value</i>
t	: Thickness (inch)
P	: Tekanan perancangan (kPa)
S	: Maximum Allowable Stress (psi)
R	: Radius dalam tubing
E	: Efisiensi sambungan pada tubing ($E=1$)

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Di era globalisasi sekarang ini perubahan terjadi di berbagai bidang antara lain bidang politik, ekonomi, sosial, budaya, transportasi, telekomunikasi termasuk ilmu pengetahuan dan teknologi. Di dalam dunia teknologi sekarang ini, khususnya teknologi pembangkit listrik tenaga uap terdapat sistem alat pembangkit yang sangat penting yaitu boiler. Boiler merupakan suatu alat untuk menghasilkan uap pada tekanan dan temperature tinggi. Perubahan dari fase cair menjadi uap dilakukan dengan memanfaatkan energy panas yang didapatkan dari fase cair menjadi uap yang didapatkan dari pembakaran bahan bakar [1]

Boiler merupakan peralatan utama yang terdapat pada proses pembangkit listrik tenaga uap yang berfungsi untuk menghasilkan uap (steam) yang digunakan sebagai energi penggerak *steam engine*. Pada sistem PLTU boiler memiliki fungsi sangat vital[1]. Boiler menghasilkan uap air yang memiliki tekanan tinggi. Jika terjadi kebocoran akan dapat melukai orang disekitarnya atau bahkan bisa meledak dan akan merusak lingkungan disekitarnya. Oleh karena itu perlu adanya perancangan boiler yang sesuai. Jenis boiler yang dirancang yaitu *water tube boiler*. Boiler jenis ini banyak dipakai untuk kebutuhan uap skala besar. Prinsip kerja dari boiler pipa air berkebalikan dengan pipa api, gas pembakaran dari *furnace* dilewatkan ke pipa-pipa yang berisi air yang akan diuapkan [2].

Standart perancangan boiler yang digunakan disesuaikan dengan kebutuhan proses pemanasan sistem uap pada pembangkit listrik tenaga uap. Jadi rancang bangun boiler yang akan dibuat memiliki konstruksi yang aman untuk digunakan pada pembangkit listrik tenaga uap. Maka dari itu untuk membantu memenuhi kebutuhan listrik, penulis merancang sebuah boiler dengan tipe *water tube boiler*

berbahan bakar LPG yang dapat membantu ketersediaan uap panas dalam skala rendah yang berguna untuk memenuhi kebutuhan listrik[3].

Oleh karena itu diambil judul pada tugas akhir ini mengenai perancangan konstruksi *boiler*. Sehingga, tugas ini di beri judul “PERANCANGAN DESAIN BOILER PADA PLANT MINI STEAM ENGINE UNTUK PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA UAP”

1.2 Rumusan Masalah

Dalam penyusunan tugas akhir ini, masalah yang akan dibahas adalah:

1. Bagaimana perancangan konstruksi *boiler* jenis *Vertical Water Tube* skala laboratorium yang menghasilkan uap jenuh 110-130 °C untuk digunakan sebagai penggerak steam engine pada pembangkit listrik tenaga uap?
2. Bagaimana cara menghitung dimensi untuk perencanaan *Vertical Water Tube Boiler* sesuai dengan kapasitas, tekanan dan temperatur keluaran yang diinginkan?

1.3 Tujuan Penulisan

Dengan mengacu latar belakang dan permasalahan diatas maka tujuan dari penulisan tugas akhir ini adalah:

1. Menghasilkan perancangan konstruksi boiler yang presisi dengan jenis *Vertical Water Tube Boiler* dengan uap jenuh 110-130 °C untuk digunakan sebagai penggerak steam engine pada pembangkit listrik tenaga uap.
2. Menghasilkan dimensi *Vertical Water Tube Boiler* yang sesuai dengan kapasitas, tekanan dan temperature keluaran yang di inginkan.

1.4 Batasan Masalah

Dalam pembahasan perencanaan ini, penulis memberikan batasan masalah untuk lebih memfokuskan isi laporan, sebagai berikut :

1. Kapasitas, tekanan dan temperatur keluaran *water tube boiler* diketahui sebagai data awal untuk menghitung perpindahan panas serta perhitungan untuk menentukan dimensi dari *water tube boiler*.
2. Hanya menghitung perpindahan panas yang terjadi pada *water tube boiler*.
3. Bahan bakar yang digunakan yaitu LPG yang beredar dalam pasaran.
4. Temperatur awal air dan temperatur awal pembakaran memakai suhu kamar yaitu 30°C
5. Bahan yang digunakan sebagai material boiler adalah bahan yang beredar di pasaran.

1.5 Manfaat

Adapun manfaat yang dapat diperoleh dari tugas akhir ini yaitu :

1. Tugas akhir ini dapat dijadikan untuk bekal bagi peserta untuk kedepannya dalam menghadapi dunia industri
2. Tugas akhir ini dapat dijadikan sebagai ajang menambah pengetahuan bagi adik tingkat di Departemen Teknik Instrumentasi

Halaman Sengaja Dikosongkan

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Definisi Boiler

Ketel uap (*boiler*) adalah suatu bejana tertutup yang terbuat dari baja yang digunakan untuk menghasilkan uap panas. Didalam dapur (*furnace*), energi kimia dari bahan bakar dirubah menjadi panas melalui proses pembakaran dan panas yang dihasilkan sebagian besar diberikan kepada air yang berada didalam ketel sehingga, pengaruh dari proses pemanasan air tersebut berubah menjadi uap. Uap yang dihasilkan dari sebuah ketel dapat digunakan sebagai fluida kerja maupun media pemanas untuk berbagai macam keperluan - keperluan rumah tangga sampai dengan keperluan industri[2].

Prinsip kerja boiler ini yaitu pengubahan dan pemindahan energi yang dikandung bahan bakar menjadi energi yang dikandung uap air. Proses pelepasan energi bahan bakar dilakukan dengan cara mereaksikan bahan bakar dengan oksigen yang diambil dari udara. Pencampuran antara unsur-unsur yang dapat terbakar pada bahan bakar dengan oksigen akan menyebabkan terlepasnya energi yang dikandung bahan bakar. Energi tersebut akan menaikkan tingkat energi gas asap sehingga temperatur gas tersebut naik. Kenaikan temperatur gas yang tinggi menyebabkan terjadinya perpindahan energi panas, baik radiasi maupun konveksi dari gas asap ke dinding air. Energi tersebut diperlukan untuk menaikkan temperatur air menjadi uap. Gas asap yang telah melepaskan energi mengalami penurunan temperatur. Air yang telah diolah di Water Treatment Plant (WTP) yang memiliki konduktifitas nol dan kandungan SiO_2 rendah, biasanya disebut Demineralisasi Water[4].

Demineralisasi Water masuk ke dalam Deaerator untuk menghilangkan gas O₂ yang dapat menimbulkan pengkaratan. Di dalam deaerator, air dijatuhkan dari atas dan uap dialirkan ke atas agar pemanasan berlangsung dengan efektif. Air yang telah dipanaskan dialirkan ke dalam boiler untuk dinaikkan temperaturnya dan dijadikan uap. Udara yang diperlukan untuk pembakaran diambil dari ruangan sekitar oleh blower. Udara tersebut kemudian dialirkan ke masing - masing burner dan dicampur dengan bahan bakar dengan komposisi tertentu. Boiler atau ketel uap merupakan suatu bejana tertutup yang terbuat dari baja. Boiler berfungsi untuk mentransfer panas yang dihasilkan dari pembakaran bahan bakar ke air yang menjadi uap atau steam yang berguna. Uap ini digunakan untuk proses - proses industri, penggerak, pemanas, dan lain - lain. Pencampuran bahan bakar dengan udara pembakaran terjadi di alat pembakar/burner.

2.2 Klasifikasi Ketel Uap

Secara umum ketel dibedakan dalam dua golongan utama yaitu ketel pipa api (*Fire Tube Boiler*) dan ketel pipa air (*Water Tube Boiler*). Untuk membedakan secara terperinci, ketel dapat digolongkan menurut peninjauan dari berbagai segi terhadap ketel tersebut yakni :

2.2.1 Menurut Isi Pipanya

a) Ketel Pipa Api (*Fire Tube Boiler*)

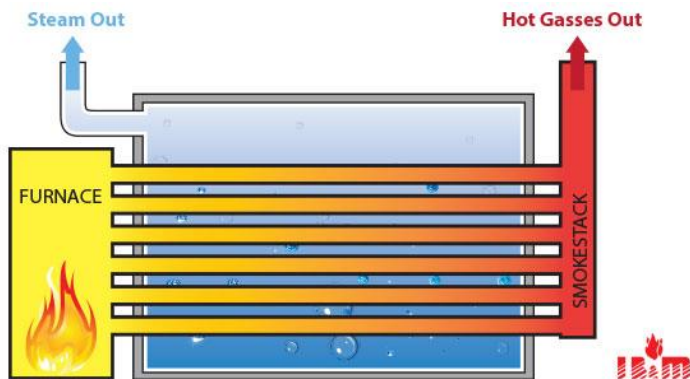
Pada ketel jenis ini api dan gas panas yang dihasilkan oleh pembakaran bahan bakar mengalir melalui pipa - pipa yang dikelilingi oleh air yang berfungsi sebagai penyerap panas. Panas dihantarkan melalui dinding - dinding pipa dari gas - gas panas ke air disekelilingnya[5]. Boiler pipa api dapat menggunakan bahan bakar minyak, gas, dan bahan bakar padat.

Boiler pipa api memiliki keuntungan sebagai berikut:

1. Konstruksi yang relatif lebih kuat.
2. Biaya perawatan murah.
3. Pengoperasian dan perawatan mudah.
4. Flexibilitas dalam pengaturan dan perubahan beban pada saat pengoperasiannya.

Akan tetapi, terdapat juga beberapa hal yang tidak menguntungkan, diantaranya:

1. Kapasitas kecil
2. Efisiensi termal rendah
3. Lambat mencapai tekanan kerja maksimum



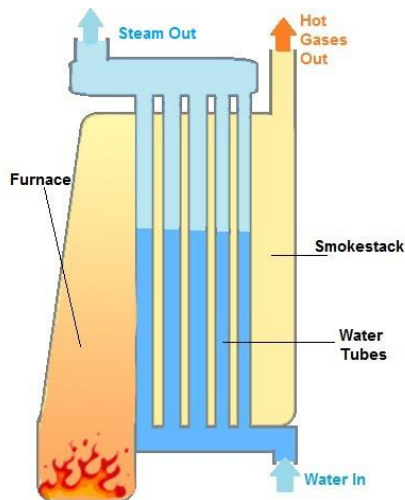
Gambar 2.1 Bagan Ketel Pipa Api

b) Ketel Pipa Air (*Water Tube Boiler*)

Ketel pipa air ini adalah ketel yang peredaran airnya terjadi didalam pipa – pipa yang dikelilingi oleh nyala api dan gas panas dari luar susunan pipa. Kontruksi pipa – pipa yang dipasang didalam ketel dapat berbentuk lurus (*Straight Tube*) dan juga dapat berbentuk pengkolan (*Bend Tube*) tergantung dari jenis ketelnya. Pipa – pipa yang lurus dipasang secara paralel didalam

ketel dihubungkan dengan *Header*, kemudian *Header* tersebut dihubungkan dengan bejana uap yang dipasang secara *horizontal* diatas susunan pipa, lihat gambar (2.3). Susunan pipa diantara kedua *Header* mempunyai kecondongan tertentu (sekitar 15° dari garis datar) hal ini dimaksudkan agar dapat menimbulkan peredaran air dalam ketel. Contoh ketel yang termasuk kedalam golongan ini adalah *Ketel Benson*, *Ketel Babcock and Wilcox*, *Ketel Lamont*, *Ketel Yarrow*, dan *Ketel Loeffler*[6].

Ketel pipa air ini terbilang ketel yang dibuat untuk kapasitas besar dimana industri – industri besar yang memerlukan pasokan listrik besar menggunakan model ketel pipa air untuk menjadi penghasil steam guna membangkitkan listrik. Dalam segi perawatan juga ketel pipa air lebih susah daripada ketel pipa api yang lebih praktis. Ketel pipa air ini membutuhkan



Gambar 2.3 Bagan Ketel Pipa Air

2.2.2 Menurut Posisi Dapur (*Furnace*)

Menurut Posisi Dapur (*Furnace*), ketel dapat digolongkan sebagai berikut :

- a) Ketel pengapian dalam (*Internal Fired Boiler*)
- b) Ketel pengapian luar (*External Fired Boiler*)

Pada ketel jenis pengisian dalam, dapur (*furnace*) tempat pengapian ditempatkan didalam *shell*. Kebanyakan dari ketel pipa api memiliki pengapian dalam (*Internal Fired Boiler*) dimana pembakaran bahan bakar dilakukan didalam *shell* itu sendiri dan hasil dari pembakarannya diterima langsung dari *shell* tersebut.

2.2.3 Menurut Penggunaan

- a) *Utility Boiler*

Memproduksi uap untuk pembangkit tenaga listrik. Kapasitas besar, tekanan dan temperatur uap tinggi, efisiensi tinggi, dapur dinding pipa air dengan *burner*, bila dengan tekanan lebih besar dari 14 Mpa biasanya dengan *reheater*.

- b) *Industrial Boiler*

Memproduksi uap untuk pemanasan dan proses. Biasanya memiliki kapasitas yang kecil, tekanan dan temperatur uap lebih rendah, dapur dengan *burner, stoker* atau *fluidized bed*, tanpa *reheater*.

- c) *Marine Boiler*

Memproduksi uap sebagai sumber penggerak kapal. Bentuknya kompak, bobot lebih ringan, biasanya menggunakan bahan bakar minyak, tanpa *reheater*.

2.2.4 Berdasarkan Tekanan Kerja

- a) Boiler Bertekanan Rendah Dan Sedang (<10 Mpa)

Digunakan sebagai *Industrial Boiler*, *sirkulasi natural*, beberapa diantaranya dengan *Boiler bank*, dapur dengan *burner* atau *stoker*, tanpa *reheater*.

b) Boiler Tekanan Tinggi (10 – 14 Mpa)

Digunakan sebagai *utility boiler*, biasanya dengan *reheater* hanya bila tekanannya > 14 Mpa, dan menggunakan sirkulasi natural.

c) Boiler Dengan Tekanan Sangat Tinggi (> 17 Mpa)

Digunakan sebagai *utility boiler*, *sirkulasi paksa* atau paksa, tergantung dari pada *engineering-economical approach*, dengan *reheater*; harus dipertimbangkan pencegahan terhadap *film boiling* dan korosi karena temperatur tinggi.

d) Boiler Tekanan Super Kritis (> 22,1 Mpa) Digunakan sebagai *utility boiler*, kapasitas besar, sirkulasi *once-through* atau kombinasi, dengan *reheater*; harus dipertimbangkan pencegahan terhadap *pseudo-film boiling* dan korosi karena temperatur tinggi.

2.3 Bagian – bagian Ketel Uap

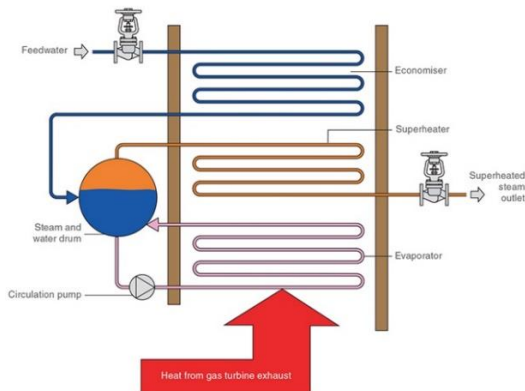


Fig. 3.3.9 A forced circulation water-tube boiler as used on CHP plant

Gambar 2.3 Bagian – Bagian Boiler

a) Pemanas Lanjut Uap (*Superheater*)

Pemanas Lanjut Uap (*Superheater*) ialah alat untuk memanaskan uap kenyang menjadi uap yang dipanaskan lanjut. Uap yang dipanaskan lanjut digunakan untuk melakukan kerja dengan jalan ekspansi didalam turbin atau mesin uap tidak akan segera mengembun, sehingga mengurangi kemungkinan timbulnya bahaya yang disebabkan timbulnya pukulan balik (*Back Stroke*) yang diakibatkan mengembungnya uap belum pada waktunya sehingga menimbulkan vakum ditempat yang tidak semestinya didaerah ekspansi.

b) Ekonomiser

Gas asap setelah meninggalkan *superheater* temperaturnya masih sangat tinggi sekitar 500°C hingga 800°C, sehingga akan menimbulkan kerugian panas yang besar apabila gas asap tersebut langsung dibuang melalui cerobong. Gas asap yang masih panas ini dapat dimanfaatkan untuk memanasi air terlebih dahulu sebelum dimasukan kedalam drum ketel, sehingga air telah dalam keadaan panas, sekitar 30 hingga 50°C dibawah temperatur mendidihnya. Air yang telah dalam keadaan panas pada saat masuk kedalam drum ketel membawa keuntungan karena ditempat air masuk kedalam drum, dinding tidak mengerut sehingga drum ketel dapat lebih awet dengan demikian biaya perawatannya akan menjadi lebih murah.

Keuntungan yang kedua adalah dengan memanfaatkan gas asap yang masih mempunyai temperatur yang tinggi tersebut untuk memanasi air sebelum masuk kedalam drum ketel, berarti akan memperbesar efisiensi dari ketel uap, karena dapat memperkecil kerugian panas yang diderita oleh ketel.

c) Ruang Bakar (*furnace*)

Ruang bakar berfungsi sebagai tempat pembakaran bahan bakar. Bahan bakar dan udara dimasukkan kedalam ruang bakar sehingga terjadi pembakaran. Dari pembakaran bahan bakar dihasilkan sejumlah panas dan nyala api/gas asap yang berguna untuk memanasi air ketel.

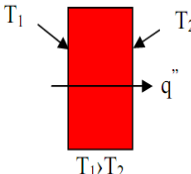
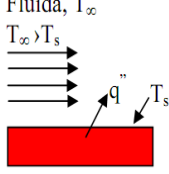
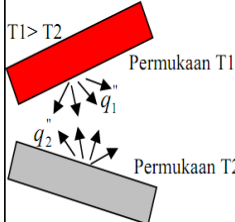
Dinding ruang bakar umumnya dilapisi dengan pipa-pipa yang berisi air ketel (*waterwall*). Air dalam pipa-pipa ini senantiasa bersirkulasi untuk mendinginkan dinding pipa dan sekaligus berfungsi sebagai pipa penguap. Dari *drum* atas air turun melalui pipa *downcomer* atau pipa-pipa konveksi dan pada pipa-pipa *waterwall* air naik kembali menuju drum atas. Semakin cepat laju peredaran air, pendinginan dinding pipa bertambah baik dan kapasitas uap yang dihasilkan bertambah besar.

d) Cerobong Asap

Cerobong digunakan untuk mengalirkan gas asap keluar dari ketel uap atau dengan kata lain digunakan untuk membuang gas asap setinggi mungkin sehingga tidak mengganggu lingkungan disekitar.

2.4 Perpindahan Panas

Perpindahan panas adalah perpindahan energi panas/kalor sebagai akibat adanya perbedaan temperatur. Jadi berdasarkan definisi tersebut jika ada perbedaan temperatur antara dua media, perpindahan panas pasti terjadi. Gambar 2.4 memperlihatkan perbedaan cara perpindahan panas tersebut disebut *modes of heat transfer*, jika ada *gradient temperature* pada media yang diam, baik pada benda padat ataupun liquid perpindahan panas yang terjadi disebut konduksi. Jika ada *gradient temperatur* antara benda padat dengan liquid yang mengalir disekitarnya perpindahan panas yang terjadi disebut konveksi.

Konduksi melalui dinding padat atau cairan diam	Konveksi dari permukaan padat ke aliran fluida	Pertukaran radiasi neto antara dua permukaan
		

Gambar 2.4 Perpindahan panas konduksi, konveksi dan radiasi

Semua permukaan yang memiliki temperatur memancarkan energi dalam bentuk gelombang elektromagnetik, sehingga ada atau tidak ada media perantara perpindahan panas pasti terjadi antara dua permukaan yang berbeda temperaturnya. Perpindahan panas yang demikian ini disebut radiasi.

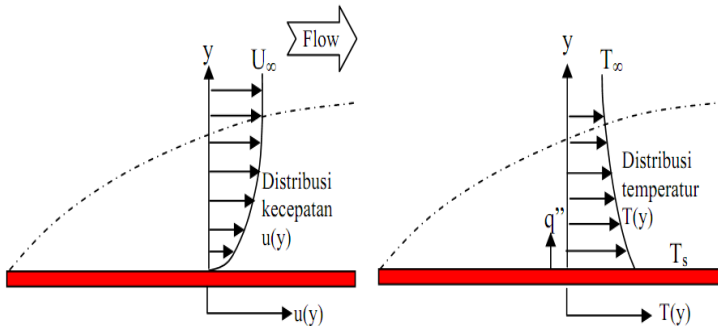
2.4.1 Konduksi

Perpindahan panas konduksi adalah perpindahan panas yang bergantung pada aktivitas pada level atom dan molekuler. Konduksi digambarkan sebagai perpindahan panas yang terjadi dari partikel yang berenergi lebih tinggi ke partikel yang berenergi lebih rendah dari suatu media sebagai akibat dari interaksi antar partikel tersebut. Gambar 2.5 memperlihatkan mekanisme tersebut. Pada gambar tersebut dapat dilihat bahwa partikel-partikel bergerak secara acak sehingga memungkinkan satu partikel bersinggungan dengan partikel yang lain. Sehingga apabila yang bersinggungan tersebut partikel yang berbeda tingkat energinya maka perpindahan panas pasti terjadi. Jika $T_1 > T_2$ maka akan terjadi perpindahan panas ke arah sumbu x positif. Karena perpindahan panas konduksi terjadi

akibat gerakan acak partikel maka juga disebut difusi energi.

2.4.2 Konveksi

Perpindahan panas konveksi didukung oleh gerakan acak molekuler dan gerakan makroskopik dari fluida diantara permukaan dan lapisan batas. Kontribusi dari gerak acak molekuler (difusi) biasanya lebih dominan di daerah dekat dengan permukaan padat dimana pada daerah tersebut kecepatan aliran makroskopiknya nol. Jadi pada daerah tersebut ($y = 0$) panas dipindahkan melalui mekanisme gerak acak molekuler. Kontribusi dari gerakan makroskopik fluida, dimulai pada daerah dimana sudah terjadi pertumbuhan lapisan batas, yang artinya kecepatan aliran fluida (kearah sumbu x) meningkat sedikit lebih besar dari nol.



Gambar 2.5 Pertumbuhan lapisan batas pada perpindahan panas konveksi.

Perpindahan panas konveksi juga dikategorikan berdasarkan penyebab terjadinya aliran fluida. Jika aliran fluida yang terjadi disebabkan oleh faktor eksternal seperti: pompa, fan/blower atau juga angin pada udara atmosfer maka perpindahan panas konveksi yang terjadi disebut konveksi paksa. (forced

convection). Jika aliran fluida dihasilkan oleh tarikan gaya buoyancy yang dihasilkan oleh adanya variasi massa jenis fluida, (variasi massa jenis dihasilkan oleh adanya perbedaan temperatur antara satu lokasi dengan lokasi yang lain dalam satu wadah) maka disebut konveksi bebas atau konveksi alam.

Untuk menghitung fluks panas konveksi dapat menggunakan sebuah persamaan yang dikenal dengan nama NEWTON'S LAW OF COOLING yaitu:

$$q'' = h (T_s - T_\infty) \text{ (W/m}^2\text{)} \dots \dots \dots (2.1)$$

$$q = hA (T_s - T_\infty) \text{ (Watt)} \dots \dots \dots (2.2)$$

Keterangan :

q'' : fluks panas konveksi (W/m²)

T_s : temperatur permukaan padat (K)

T_∞ : temperatur rata – rata fluida (K)

h : koefisien perpindahan panas konveksi (disebut juga konduktansi film/lapisan fluida [W/m²K])

Koefisien perpindahan panas konveksi tersebut tergantung pada kondisi lapisan batas yang tergantung juga pada geometri permukaan, penyebab terjadinya aliran fluida, dan sifat-sifat termodinamika dari fluida. Untuk menyelesaikan beberapa persoalan perpindahan panas konveksi koefisien h tersebut harus diketahui.

Tabel 2.1. Harga Tipikal dari Koefisien Perpindahan Panas konveksi:

No	Terminologi	$h(W/m^2 \cdot ^\circ K)$
1	Konveksi bebas/ <i>free convection/natural convection</i>	5-----25
2	Konveksi paksa/ <i>forced convection</i> Gas Cair	25-----250 50-----20.000
3	Konveksi dengan perubahan fasa/ <i>convection with phase change</i> Mendidih Kondensasi	2500—100.000 2500—100.000

2.4.2.1 Konveksi Pada Pipa

Berikut adalah konveksi pada pipa yang terjadi pada aliran full developed, sebagai berikut :

1. Aliran Laminer

a) *Constant Surface Heat Flux*

Jika kasus yang terjadi adalah perpindahan panas dimana ΔT pada seluruh permukaan perpindahan panas sama, maka q'' diseluruh permukaan konstan.

$$Nu_D = \frac{hD}{k} = 4,36 \longrightarrow q'' = \text{konstan}$$

b) Constant surface temperatur:

Jika kasus yang terjadi adalah perpindahan panas dimana T_s pada seluruh permukaan perpindahan panas sama, maka q'' local diseluruh permukaan tidak sama.

$$Nu_D = \frac{hD}{k} = 3,36 \longrightarrow T_s = \text{konstan}$$

2. Aliran Turbulen

Korelasi konveksi untuk aliran *turbulen full developed* baik termal maupun hidrodinamik, diintrodusir oleh Dittus-Boelter berikut:

$$Nu_D = 0,023 Re_D^{4/5} Pr^n \dots\dots\dots (2.3)$$

Dimana $n = 0,4$ untuk pemanasan ($T_s > T_m$) dan $n = 0,3$ untuk pendinginan ($T_s < T_m$), dengan :

$$T_m = \frac{T_{m,i} + T_{m,o}}{2} \dots\dots\dots (2.4)$$

$T_{m,i}$ = Temperatur fluida masuk

$T_{m,o}$ = Temperatur fluida keluar

Syarat berlakunya korelasi tersebut adalah:

$$[0,6 \leq Pr \leq 160, Re_D \geq 10.000, L/D \geq 10]$$

Jika karakteristik aliran disertai dengan perubahan sifat yang besar maka korelasi Sider and Tate:

$$Nu_D = 0,027 Re_D^{4/5} Pr^{1/3} \left(\frac{\mu}{\mu_s} \right)^{0,14} \dots\dots\dots (2.5)$$

$$\left[\begin{array}{l} 0,7 \leq Pr \leq 16.700 \\ Re_D \geq 10.000 \\ \frac{L}{D} \geq 10 \end{array} \right]$$

Semua sifat dalam persamaan diatas dievaluasi pada T_m kecuali μ_s dievaluasi pada temperatur permukaan. Korelasi ini berlaku baik konstan fluks panas maupun temperatur permukaan seragam. Korelasi yang sesuai untuk aliran pada pipa halus

dengan jangkauan bilangan Reynolds yang luas termasuk daerah transisi diintrodusir oleh Gnielinski:

$$Nu_D = \frac{(f/8)(Re_D - 1000)Pr}{1 + 12,7(f/8)^{1/2}(Pr^{2/3} - 1)}$$

Korelasi berlaku untuk :

$$[0,5 \leq Pr \leq 2000 \text{ and } 3000 \leq Re_D \leq 5 \times 10^6]$$

Korelasi tersebut berlaku untuk fluks panas konstan maupun temperatur permukaan seragam, faktor gesekan f dilihat pada diagram Moody dan semua properti/sifat dievaluasi pada T_m .

Pada aliran turbulen melalui pipa kasar, koefisien konveksi bertambah besar karena kekasaran permukaan tersebut. Bilangan Nusselt dihitung juga dapat dengan persamaan 31. Keterbatasan persamaan adalah jika harga f naik 4 kali dari f pipa halus maka h tidak banyak lagi dipengaruhi oleh peningkatan f tersebut. (Bhatti and Shah).

Daerah entry length pada aliran turbulen sangat pendek $10 \leq (X_{fd}/D) \leq 60$ hal ini menjadi cukup beralasan mengambil asumsi bahwa bilangan Nusselt rerata untuk seluruh pipa sama dengan harga yang menganggap seluruh aliran full developed $N_{UD} \approx N_{UD,fd}$. Dalam mencari Nusselt rerata tersebut semua sifat dievaluasi pada temperatur aritmetik $T_m = (T_{m,i} + T_{m,o})/2$.

Korelasi diatas tidak berlaku untuk logam cair. Untuk aliran logam cair turbulen pada pipa halus dengan fluks panas konstan Skupinski merekomendasikan korelasi:

$$Nu_D = 4,82 + 0,0185 Pe_D^{0,827} \quad q_s'' = \text{constant}$$

$$\left[\begin{array}{c} x \cdot 10^{-3} \leq Pr \leq 5 \cdot 10^{-2} \\ 3,6 \cdot 10^3 \leq Re_D \leq 9,05 \cdot 10^5 \\ 10^2 \leq Pe_D \leq 10^4 \end{array} \right]$$

Untuk aliran logam cair turbulen pada pipa halus dengan temperatur permukaan seragam Seban and Shimazaki merekomendasikan korelasi untuk $Pe_D \geq 100$:

$$Nu_D = 5,0 + 0,025 Pe_D^{0,8} \quad T_s = \text{constant}$$

2.4.3 Radiasi

Radiasi termal adalah emisi (pancaran) energi dari suatu material yang memiliki temperatur tertentu. Radiasi dapat dipancarkan baik oleh material padat, cair maupun gas. Mekanisme perpindahan panas secara radiasi ini dihubungkan dengan adanya perubahan konfigurasi elektron dari atom atau molekul material yang bersangkutan. Lebih lanjut medan energi radiasi ini dipancarkan sebagai gelombang elektromagnetik. Jadi perpindahan panas radiasi tidak memerlukan media seperti perpindahan panas konduksi dan konveksi. Perpindahan panas radiasi akan lebih efektif jika terjadi pada ruang vacuum[9].

Fluks pancaran panas radiasi maksimum dari suatu permukaan dihitung berdasarkan hukum STEFAN - BOLTZMANN yaitu:

$$q'' = \sigma T_s^4 \dots \dots \dots (2.6)$$

Keterangan

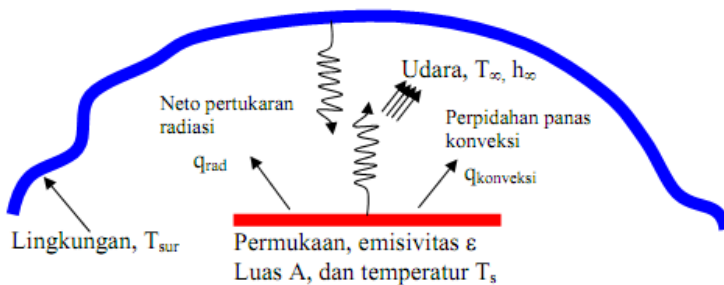
q'' : fluks pancaran panas radiasi (W/m^2)

σ : konstanta Stefan - Boltzmann ($5,67 \times 10^{-8} W/m^2 K^4$)

T_s : temperatur permukaan (K)

Fluks pancaran panas radiasi maksimum yang dipancarkan oleh permukaan radiator sempurna disebut benda hitam (black body). Fluks pancaran panas radiasi yang sebenarnya lebih kecil dari fluks maksimum tersebut yaitu:

$$q'' = \varepsilon \sigma T_s^4 \quad 5)$$



Gambar 2.6 Pertukaran Radiasi antara Permukaan dengan Sekelilingnya.

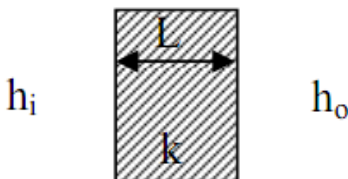
Setiap material yang bertemperatur memancarkan radiasi, jadi yang terpenting adalah menghitung laju pertukaran radiasi netto antara dua benda yang saling memancarkan radiasi. Kasus yang sering dijumpai adalah pertukan netto antara benda kecil dengan lingkungannya yang melingkupi seluruh benda yang kecil tersebut. Artinya seluruh pancaran radiasi benda kecil

diasumsikan diterima seluruhnya oleh lingkungan yang melingkupinya. Diantara benda dengan lingkungannya dipisahkan oleh gas yang tidak berpengaruh terhadap perpindahan panas radiasi.

2.5 Koefisien Perpindahan Panas Keseluruhan

Koefisien perpindahan panas keseluruhan merupakan koefisien perpindahan panas gabungan yang meliputi seluruh koefisien yang ada mulai dari fluida dingin sampai ke fluida panas, termasuk juga adanya faktor kerak (*fouling factor*) yang mungkin terjadi sesudah pesawat digunakan.

Jika kedua fluida dipisahkan oleh **dinding datar** maka koefisien perpindahan panas keseluruhan adalah:



$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{L}{k} + \frac{1}{h_o}} \dots\dots\dots(2.7)$$

Jika kedua fluida dipisahkan oleh **dinding silinder** (pipa) maka:

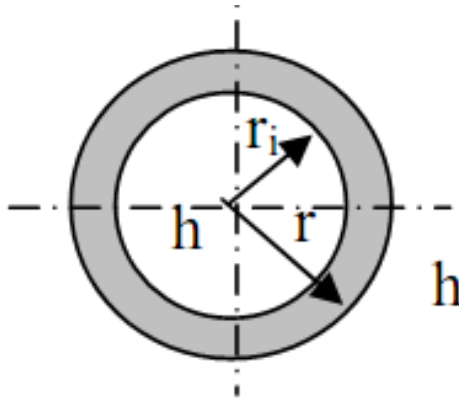
Berdasarkan luas permukaan luar pipa

$$U_o = \frac{1}{\frac{1}{h_o} + \frac{r_o}{k} \ln \frac{r_o}{r_i} + \frac{r_o}{r_i} \frac{1}{h_i}}, \dots\dots\dots(2.8)$$

Berdasarkan luas permukaan dalam pipa

$$U_i = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{r_i}{k} \ln \frac{r_o}{r_i} + \frac{r_i}{r_o h_o}} \dots \dots \dots (2.9)$$

Dimana, $U_i A_i = U_o A_o$



Jika memperhitungkan adanya **fouling factor** (kerak) persamaan menjadi:

$$U_o = \frac{1}{\frac{1}{h_o} + R_{f,o} + \frac{r_o}{k} \ln \frac{r_o}{r_i} + R_{f,i} + \frac{r_o}{r_i} \frac{1}{h_i}} \dots \dots \dots (2.10)$$

$$U_i = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + R_{f,i} + \frac{r_i}{k} \ln \frac{r_o}{r_i} + R_{f,o} + \frac{r_i}{r_o} \frac{1}{h_o}} \dots \dots \dots (2.11)$$

Harga representasi **fouling factor** adalah:

Tabel 2.2: Harga representasi *fouling factor* (Incropera)

Fluid	$R_f (m^2 \cdot K/W)$
Seawater and treated boiler feedwater (below 50C)	0.0001
Seawater and treated boiler feedwater (above 50C)	0.0002
River water (below 50C)	0.0002 s/d 0.0001
Fuel oil	0.0009
Refrigerating liquids	0.0002
Steam (non oil bearing)	0.0009

Tabel 2.3: Harga representasi koefisien perpindahan panas keseluruhan (Incropera)

Kombinasi Fluida	$U (W /m^2 \cdot K)$
Air ke air	850 s/d 1700
Air ke minyak	110 s/d 350
Kondensor uap (air di dalam tube)	1000 s/d 6000
Kondensor amoniak (air di dalam tube)	800 s/d 1400
Kondensor alkohol (air di dalam tube)	250 s/d 700
Heat exchanger dengan sirip (air dalam tube, udara silang)	25 s/d 50

2.6 Efisiensi Boiler

Efisiensi adalah suatu tingkatan kemampuan kerja dari suatu alat. Sedangkan efisiensi pada boiler adalah prestasi kerja atau tingkat unjuk kerja boiler atau ketel uap yang didapatkan dari perbandingan antara energi yang dipindahkan ke atau diserap oleh fluida kerja didalam ketel dengan masukan energi kimia dari bahan bakar. Untuk tingkat efisiensi pada boiler atau ketel uap

tingkat efisiensinya berkisar antara 70% hingga 90%. Terdapat dua metode pengkajian efisiensi boiler:

- Metode Langsung: energi yang didapat dari fluida kerja (air dan steam) dibandingkan dengan energi yang terkandung dalam bahan bakar boiler.
- Metode Tidak Langsung: efisiensi merupakan perbedaan antara kehilangan dan energi yang masuk

$$\eta = \frac{\text{Energi keluar}}{\text{Energi Masuk}} \times 100\% \dots \dots \dots (2.12)$$

$$\eta = \frac{\text{Energi total pada fluida kerja}}{\text{Energi masukan bahan bakar total}} \times 100\%$$

2.7 Penelitian Sebelumnya

Berikut akan dilampirkan hasil dari beberapa penelitian dan tugas akhir yang serupa dengan pengerjaan tugas akhir ini.

2.7.1 Perancangan Boiler Fire Tube untuk Pabrik Tahu

Perancangan ini di diambil dari Tugas Akhir Dwi Ardiyanto Effendy Mahasiswa Teknik Mesin Universitas Negeri Semarang yang membuat boiler untuk sistem pemanas pada pabrik tahu. Perancangan itu menghasilkan Boiler berjenis Fire Tube dengan kapasitas 100kg/jam, tekanan design 6 bar, temperature uap pada 150, metode analisis statis menggunakan software CATIA V5. Diameter Pipa yang di gunakan sebesar 68mm dan Badan Boiler 750 mm.

2.7.2 Perancangan Boiler Fire Tube untuk Pabrik Tahu

Perancangan ini diambil dari Tugas Akhir Septi Wahyu Mahasiswa Diploma Teknik Mesin ITS yang membuat perancangan design boiler untuk sistem pemanas pabrik tahu. Perancangan itu menghasilkan Boiler berjenis Fire Tube dengan kapasitas 70kg/jam, tekanan uap yang dihasilkan 1.5 bar, Temperature uap yang dihasilkan 120, metode perhitungan thermal dan perancangan design menggunakan solid work. Diameter Pipa yang digunakan sebesar 89,9 mm dengan bahan Carbon Steel dengan diameter badan boiler sebesar 500mm.

2.7.3 Perancangan Boiler Water Tube untuk Pabrik Tahu

Perancangan ini diambil dari Jurnal Penelitian Ilmiah milik Bapak Ir. Denny ME Soedjono, MT Dosen dari Diploma Teknik Mesin ITS yang membuat perancangan design boiler untuk sistem pemanas pabrik tahu dengan bahan bakar gas LPG. Perancangan itu menghasilkan Boiler berjenis Water Tube dengan kapasitas 70kg/jam, tekanan uap yang dihasilkan 1.5 bar, Temperature uap yang dihasilkan 120, metode perhitungan thermal dan perancangan design menggunakan solid work. Diameter Pipa yang digunakan sebesar 38,1 mm dengan bahan Carbon Steel, pipa yang digunakan sepanjang 17,02 m dengan 25 luan.

Halaman Sengaja Dikosongkan

BAB III

PEMBUATAN DAN PERANCANGAN ALAT

3.1 Alat Dan Bahan

- a. Laptop
- b. Kalkulator
- c. AutoCAD

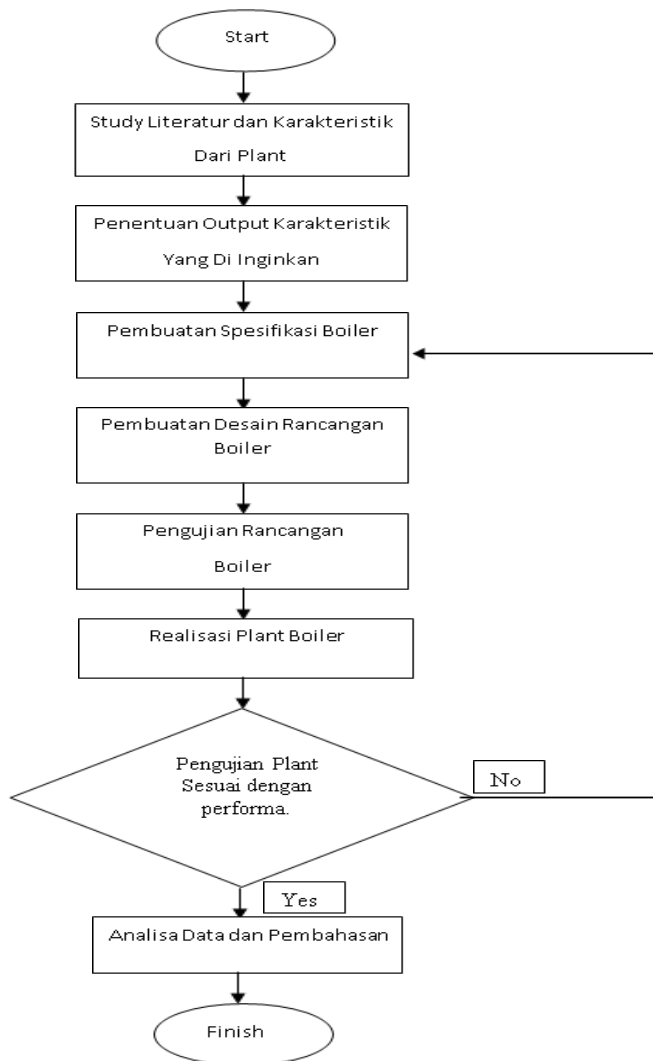
3.2 Metode Perancangan

Metode yang tepat sebelum melakukan analisis perhitungan dan perencanaan perlu dibuat, guna memudahkan dan memperlancar pelaksanaan analisis perhitungan dan perencanaan.

Pada analisis perhitungan dan perencanaan ini, kami akan menghitung data awal yang sudah diambil sebelumnya dan melengkapinya dengan data pendukung, yang nantinya dari data – data tersebut didapatkan sebuah dimensi dari *water tube boiler*. Desain penelitian yang digunakan adalah *Research and Development* yaitu metode penelitian yang digunakan untuk menghasilkan sebuah perancangan, dimana dalam perancangan tersebut mengetahui sebuah rancangan yang akan diuji. Pada penelitian ini yaitu rancang bangun *boiler* pada industri tahu meliputi perancangan konstruksi *boiler* dengan standart ASME (*American Society of Mechanical Engineers*), desain *boiler* pada *software* dan analisis struktur *boiler* dilakukan atau dibuat dengan *software autoCAD*.

Dibawah ini adalah langkah – langkah pengambilan data serta perencanaan bentuk dimensi dari *water tube boiler*. Untuk memperjelas mengenai alur dari pengerjaan tugas akhir ini, dapat dilihat pada gambar flowchart yang sudah disusun sesuai perencanaan pembuatan desain boiler ini. Mulai dari pertama study literatur hingga pembuatan laporan. Semua itu akan di susun dengan rapi pada flowchart berikut, :

3.2.1 Diagram Alir Pembuatan Water Tube Boiler



Gambar 3.1 Diagram Alir Pembuatan *Boiler*

3.3 Penjelasan Diagram Alir Proses Pembuatan *Water Tube Boiler*

Proses dalam menyelesaikan tugas akhir ini melalui beberapa tahap sebagai berikut:

3.3.1 Tinjauan Pustaka

Studi literatur yang dilakukan dengan mempelajari tentang boiler dan juga apa itu *water tube boiler*, mempelajari cara perencanaan dan juga perhitungan yang dibutuhkan untuk perancangan dari boiler. Pembelajaran itu digunakan.

3.3.2 Pengambilan Data Properties

Data tentang boiler ini kami tentukan sendiri sebagai acuan awal pembuatan.

3.3.3 Perencanaan dan Perhitungan

Setelah data diperoleh maka dibuat perencanaan desain bangun tentang *water tube boiler*. Setelah kemudian kami hitung berapa harga perpindahan panasnya, berapa panjang pipa yang diperlukan serta menentukan berapa luan pipa yang dibutuhkan.

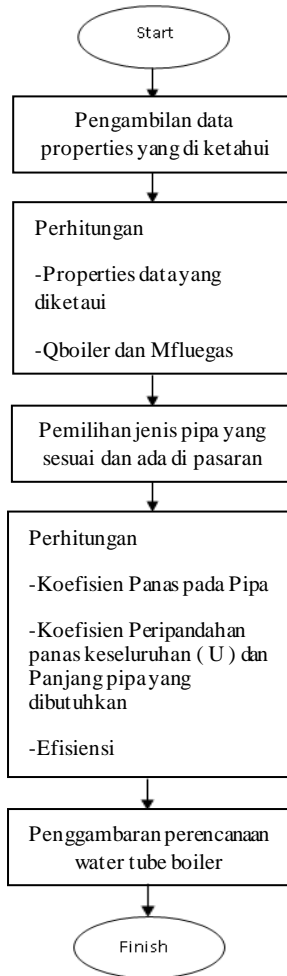
3.3.4 Pembuatan Design Perancangan

Setelah semua data yang diperlukan diperoleh melalui perhitungan. Kami menggambarkan rencana desain *water tube boiler* dalam bentuk 3D melalui AutoCAD.

3.3.5 Penyusunan Laporan

Setelah rencana desain *water tube boiler* sudah jadi dalam bentuk gambar 3D maka proses selanjutnya adalah penyusunan laporan yang berkaitan dengan desain *water tube boiler*. Setelah laporan selesai dibuat maka selanjutnya adalah menarik kesimpulan sebagai hasil akhir suatu tugas akhir.

3.4 Diagram Alir Perhitungan dan Perencanaan *Water Tube Boiler*



Gambar 3.2 Diagram Alir Perhitungan dan Perencanaan *Water Tube Boiler*

3.4 Penjelasan Diagram Alir Perhitungan dan Perencanaan *Water Tube Boiler*

Proses dalam perhitungan dan perencanaan dimensi *Water Tube Boiler* ini melalui beberapa tahap sebagai berikut:

3.4.1 Pengambilan Data Properties

Data awal boiler ini ditentukan oleh perhitungan dan juga pemilihan sesuai jenis uap yang akan dihasilkan. Karena jenis uap yang dihasilkan adalah uap jenuh maka temperature yang diambil berkisar 100-150°C dimana 100°C adalah suhu penguapan normal. Lalu ditentukan tekanan yang akan dihasilkan steam berkisar pada 2 bar sesuai dengan tekanan dari suhu yang dihasilkan steam mengacu pada tabel incopera.

Kemudian kapasitas steam yang dihasilkan didapatkan dari pencarian kebutuhan listrik yang akan digunakan. Perencanaan prototype PLTU ini nanti diharapkan akan dapat menyalakan lampu dengan daya 5 watt. Dari acuan itu maka didapatkan maka akan dicari kebutuhan steam yang harus dipenuhi untuk dapat menyalakan lampu dengan rumus sebagai berikut :

$$W_{Ti} = m_s \times h_{in} \dots \dots \dots (3.1)$$

$$W_{To} = m_s \times h_{out} \dots \dots \dots (3.2)$$

W : Daya Turbin

m_s : Kapasitas steam yang masuk kedalam turbin

h_{in} : Nilai enthalpy yang masuk kedalam turbin

h_{out} : Nilai enthalpy yang keluar dari turbin.

Dimana rumus diatas digunakan untuk mengetahui daya turbin yang digerakkan oleh steam

Kemudian setelah dilakukan perhitungan, maka data yang dihasilkan berupa:

- Temperature keluaran uap : 100-150°C
- Kapasitas keluaran uap : 20 kg/jam
- Tekanan operasi : 2 bar

3.4.2 Perhitungan Data Properties, Q_{boiler} , $m_{flue\ gas}$

Setelah data diperoleh maka menghitung data properties selanjutnya yang didapat dari mengkonversi data sebelumnya dengan tabel – tabel perpindahan panas, setelah data properties pendukung sudah didapat maka kami melanjutkan untuk menghitung kalor yang dibutuhkan oleh boiler serta laju aliran massa *flue gas* dengan rumus berikut :

$$Q_{boiler} = \dot{m}(h_{outboiler} - h_{inboiler}) \dots \dots \dots (3.3)$$

\dot{m} : massa aliran steam yang dihasilkan
 $h_{outboiler}$: enthalpy dari suhu air yang masuk kedalam boiler.
 $h_{inboiler}$: enthalpy dari suhu steam yang keluar dari boiler.

Rumus diatas digunakan untuk mencari kalor yang dibutuhkan oleh boiler guna menentukan banyaknya massa aliran bahan bakar yang digunakan. Setelah kebutuhan kalor bahan bakar didapatkan melewati perhitungan maka langkah selanjutnya adalah mencari $m_{flue\ gas}$ yang dibutuhkan oleh boiler untuk dapat menghasilkan steam, rumus yang digunakan adalah sebagai berikut :

$$\dot{m}_{flue\ gas} = \frac{Q_{flue\ gas}}{C_p \Delta T} \dots \dots \dots (3.4)$$

Dimana :

$\dot{m}_{flue\ gas}$: massa gas yang di butuhkan oleh boiler

$Q_{flue\ gas}$: Kalor yang dihasilkan oleh flue gas

C_p : Panas jenis pada tekanan tetap

Setelah mengetahui jumlah gas yang akan di gunakan untuk boiler maka selanjutnya mencari jenis aliran yang mengalir didalam pipa dan juga diluar pipa. Hal ini nanti akan berpengaruh terhadap panjangnya pipa yang akan dibutuhkan untuk boiler. Rumus untuk mencari jenis aliran yaitu menggunakan rumus bilangan Reynold, seperti berikut :

a. Rumus untuk aliran didalam pipa

$$Re_D = \frac{4 \cdot \dot{m}_{air}}{\pi \cdot D_i \cdot \mu} \dots \dots \dots (3.5)$$

Dimana :

\dot{m}_{air} = massa air

π = radial

D_i = diameter dalam pipa

μ = koefisien gesek

b. Rumus untuk aliran diluar pipa

$$Re_D = \frac{4 \cdot \dot{m}_{fluegas}}{\pi \cdot D_o \cdot \mu} \dots \dots \dots (3.6)$$

Dimana :

$\dot{m}_{fluegas}$ = massa gas

π = radial

D_o = diameter luar pipa

μ = koefisien gesek

3.4.4 Perhitungan Perpindahan Panas, Efisiensi dan Dimensi *Water Tube Boiler*

Setelah melakukan pemilihan pipa yang sesuai dan tersedia dipasaran maka kami melanjutkan menghitung jumlah perpindahan panas yang terjadi pada *water tube boiler*. Dari nilai perpindahan panas itu nantinya kita dapat menghitung panjang total kebutuhan pipa, efisiensi boiler serta dapat menentukan dimensi dari *water tube boiler* tersebut. Rumus yang digunakan sebagai berikut :

Rumus Konduksi pada Pipa :

$$\text{Konduksi pipa} = \frac{r_i}{k} \ln \frac{r_o}{r_i} \dots\dots\dots(3.7)$$

Dimana :

r_i = jari – jari dalam tubing

k = koefisien material

r_o = jari – jari luar tubing

Setelah menemukan nilai dari konduksi yang terjadi pada pipa maka yang harus dilakukan selanjutnya adalah mencari koefisien perpindahan panas pada pipa dengan rumus sebagai berikut :

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{r_i}{k} \ln \frac{r_o}{r_i} + \frac{r_i}{r_o} \frac{1}{h_o}} \dots\dots\dots(3.8)$$

Dimana :

r_i = jari – jari dalam tubing

k = Konduksi pada pipa

r_o = jari – jari luar tubing

h_i = koefisien perpindahan panas di dalam pipa

h_o = koefisien perpindahan panas di luar pipa

$$\Delta T_{lm} = \frac{(T_{hi} - T_{co}) - (T_{ho} - T_{ci})}{\ln \left[\frac{(T_{hi} - T_{co})}{(T_{ho} - T_{ci})} \right]} \dots \dots \dots (3.9)$$

Dimana :

T_{hi} = jari – jari dalam tubing

T_{co} = Konduksi pada pipa

T_{ho} = jari – jari luar tubing

T_{ci} = koefisien perpindahan panas di dalam pipa

ΔT_{lm} = perbedaan logaritmis temperatur rata - rata

$$L = \frac{Q}{U \cdot \pi \cdot D_i \cdot \Delta T_{lm}} \dots \dots \dots (3.10)$$

Dimana :

Q = kalor boiler

U = koefisien perpindahan panas

D_i = diameter dalam pipa

π = radial

ΔT_{lm} = perbedaan logaritmis temperatur rata – rata

Setelah menemukan Panjang pipa yang di inginkan maka dapat dihitung efisiensi dari *boiler* yang telah dirancang menggunakan rumus sebagai berikut :

$$\eta_{thermal} = \frac{\dot{m}_{uap} (h_{out} - h_{in})}{\dot{m}_{flue\ gas} \times LHV} \times 100\% \dots \dots \dots (3.11)$$

Dimana :

\dot{m}_{uap} = massa uap

h_{out} = enthalpy suhu keluar *boiler*

h_{in} = enthalpy suhu masuk *boiler*

$\dot{m}_{flue\ gas}$ = massa gas

LHV = Low Heating Value

3.4.3 Pemilihan Jenis Pipa Yang Sesuai dan Ada Di Pasaran

Setelah dilakukan perhitungan untuk kebutuhan panas boiler maka kami lanjutkan untuk memilih jenis pipa yang sesuai dan ada dipasaran. Pipa yang digunakan mengacu pada standard ASME (American Society Mechanical Engineer). Didalam ASME terdapat beberapa material yang bagus digunakan sebagai pipa/tubing untuk boiler dan dari banyaknya jenis bahan yang disarankan, stainless steel adalah salah satu bahan yang disarankan ASME yang mudah didapatkan dipasaran.

Lalu untuk menentukan ketebalan dari tubing agar sesuai dapat menahan tekanan yang di desain maka digunakan perhitungan dari ASME tentang ketebalan dari tubing untuk boiler. Rumusnya sebagai berikut :

$$t = \frac{PR}{SE-0,6P} \dots\dots\dots(3.12)$$

- t : Thickness (inch)
- P : Tekanan perancangan (kPa)
- S : Maximum Allowable Stress (psi)
- R : Radius dalam tubing
- E : Efisiensi sambungan pada tubing (E=1)

3.4.5 Penggambaran Perencanaan *Water Tube Boiler*

Setelah semua data yang diperlukan diperoleh melalui perhitungan. Saya menggambarkan rencana desain *water tube boiler* dalam bentuk 3D dan juga 2D melalui software drawing engineer. Dan penulis akan menggunakan AutoCAD sebagai sarana untuk menggambar.

Desain ini diambil dari beberapa studi literatur yang menggunakan bentuk vertical sebagai badan boiler, disalah satu literatur yang didapat bahwa bentuk boiler vertical yang sudah ada atau yang pernah di buat adalah fire tube boiler, dimana pipa

yang ada didalam badan boiler dialiri oleh api sedangkan air yang akan dipanaskan berada di luar bada boiler.

Dari beberapa literatur yang dipelajari dan didapat maka penulis menentukan desain dari boiler yang akan digunakan ini adalah vertical water tube boiler. Berbeda dengan fire tube boiler, water tube boiler sendiri memiliki tubing yang ada didalam badan boiler dan tubing tersebut akan dilalui oleh air yang nantinya tubing itu akan dipanaskan dari luar oleh api bersuhu tinggi yang berasal dari burner.

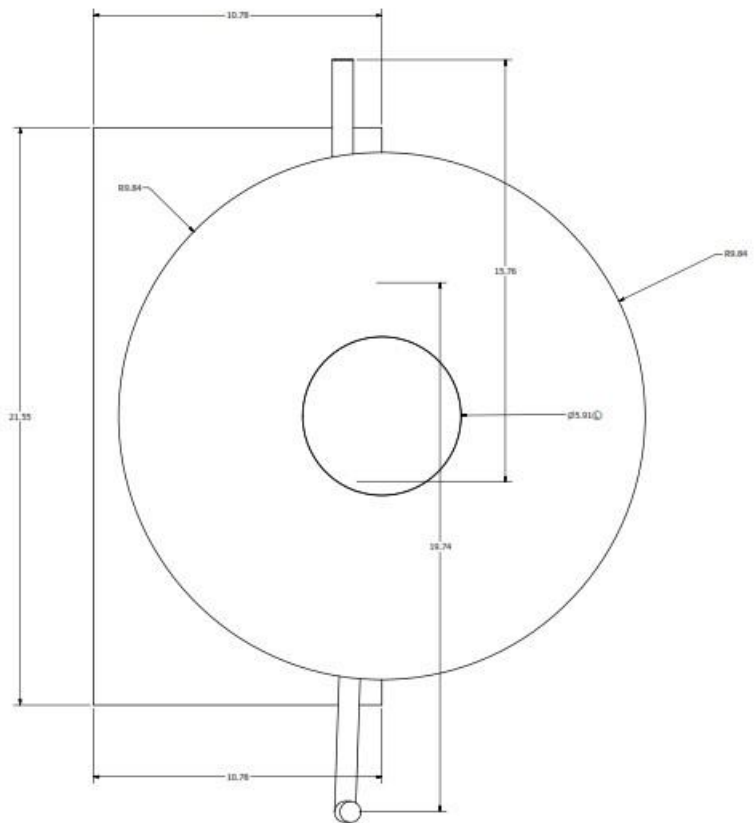
Pemilihan desain vertical ini sendiri memiliki beberapa factor yang menjadi penunjang salah satunya adalah bentuk vertical sendiri akan lebih menghemat tempat daripada bentuk water tube boiler yang ada di industri selama ini. Mengingat pembuatan alat ini sebagai protoype dari proses PLTU skala laboratorium untuk bahan pembelajaran bagi para mahasiswa, jadi penulis memutuskan untuk menggunakan tipe vertical water tube boiler dalam segi efisiensi tempat.

Setelah menentukan desain maka akan dilakukan perancangan dengan menggunakan software AutoCAD, pertama gambar yang akan di buat adalah gambar 2 dimensi Nampak depan dan atas. Pembuatan bentuk tabung untuk badan boiler lalu lengkungan untuk tube, serta pembuatan untuk cerobong keluarnya asap sisa pembakaran dan juga steam drum.

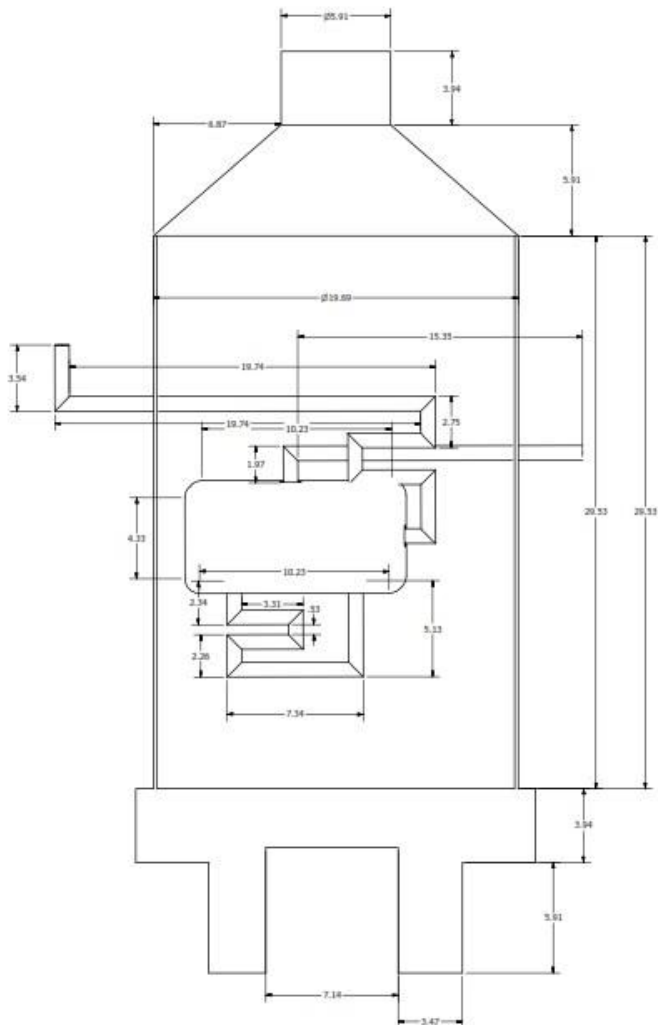
Pada software AutoCAD terdapat tools yang digunakan untuk pembentukan boiler dan juga untuk mendapatkan hasil desain yang presisi dimasukkan dimensi – dimensi yang telah didapatkan dari hasil perhitungan dan penentuan. Dengan dimensi sebagai berikut, :

Tinggi Kesuluruhan Boiler	: 130 cm
Panjang Tubing	: 6,8 m
Tinggi Furnance	: 25 cm
Diameter Badan Boiler	: 50 cm
Volume Steam Drum	: 5 liter

Tinggi Steam Drum	: 15 cm
Panjang Steam Drum	: 30 cm
Diameter Luar Tubing	: ½ dim (12,7 mm)
Diameter Dalam	: 11,5 mm
Ketebalan Tubing	: 1,2 mm
Jarak Antar Tubing	: 10 cm



Gambar 3.3 Desain 2 Dimensi Water Tube Boiler Nampak Atas

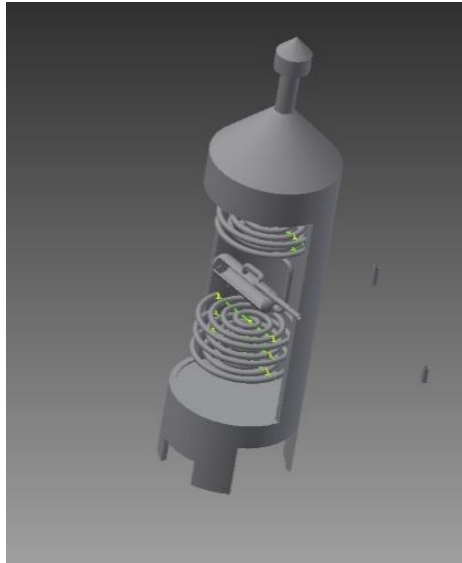


Gambar 3.4 Desain 2 Dimensi Water Tube Boiler

Gambar 3.4 adalah gambar hasil desain 2 dimensi dari AutoCAD. Disana dapat dilihat gambar tampak depan dari badan boiler dan juga ukuran – ukuran dari setiap bagian boiler agar pengukuran dan pembuatannya dapat presisi sesuai dengan dimensi yang telah di tentukan. Gambar 3.3 menunjukkan desain 2 dimensi dari Water Tube Boiler dengan posisi gambar Nampak atas. Dimana hanya terlihat cerobongnya saja apabila dilihat dari atas keseluruhan boiler. Setelah gambar 2 Dimensi selesai dibuat maka tahap selanjutnya adalah pembuatan gambar versi 3 dimensi dari boiler yang terlebih dahulu sudah di buat pada versi 2 dimensinya. Software yang digunakan sama dengan software yang digunakan untuk pembuatan gambar 2 dimensi yaitu AutoCad.



Gambar 3.5 Desain 3 Dimensi Water Tube Boiler Nampak Depan



Gambar 3.6 Desain 3 Dimensi Water Tube Boiler Nampak Atas

Gambar 3.5 serta 3.6 adalah hasil pengerjaan desain 3 dimensi dari vertical water tube boiler yang telah dirancang dengan software AutoCAD. Caranya dengan meng*excrude* desain dua dimensi yang telah dibuat kedalam bentuk 3 dimensi.

Halaman Sengaja Dikосongkan

BAB IV

PERHITUNGAN DAN PERENCANAAN

4.1 Desain Boiler



Gambar 4.1 Mini Plant Steam Engine

Desain boiler yang telah didapat berikut ini adalah merupakan hasil dari pengumpulan data dari literatur, survei lapangan dan perhitungan – perhitungan yang telah dilakukan. Spesifikasi perancangan boiler didapatkan data sebagai berikut :

Tipe Boiler	: <i>Vertical Water Tube Boiler</i>
Kapasitas	: 20kg/jam
Jenis Hasil Uap	: Uap Jenuh

Temperature Steam	: 110-150°C
Temperature Air	: 30°C
Kalor Yang Dibutuhkan	: 14,682 Joule
Tekanan Operasi	: 1,5-2 Bar
Tekanan Design	: 4 Bar
Efisiensi Boiler	: 0,558%
Bahan Bakar	: Gas LPG
Tinggi Kesuluruhan Boiler	: 130 cm
Panjang Tubing	: 6,8 m
Tinggi Furnance	: 25 cm
Diameter Badan Boiler	: 50 cm
Volume Steam Drum	: 5 liter
Tinggi Steam Drum	: 15 cm
Panjang Steam Drum	: 30 cm
Diameter Luar Tubing	: ½ dim (12,7 mm)
Diameter Dalam	: 11,5 mm
Ketebalan Tubing	: 1,2 mm
Jarak Antar Tubing	: 10 cm
Material Tubing	: Stainless Steel
Material Badan Boiler	: Besi

Material Steam Drum

: Besi

4.2 Perhitungan Perpindahan Panas

Sebelum melakukan pendesainan dari badan Boiler dan penentuan spesifikasinya, terlebih dahulu dilakukan perhitungan perpindahan panas dari boiler yang akan dirancang. Data awal yang dibutuhkan untuk perhitungan boiler adalah sebagai berikut :

1. $\dot{m}_{uap} = \dot{m}_{air} = 20 \frac{kg}{jam} = 0,005555 \frac{kg}{sec}$
2. $T_{uap} = 150^{\circ}C = 423^{\circ}K$
3. $T_{air} = 30^{\circ}C = 303^{\circ}K$
4. $P_{uap} = 2 \text{ bar}$

4.2.1 Perhitungan Kalor Boiler

Analisis untuk mencari kalor yang dibutuhkan oleh boiler, diperlukan beberapa data yang dapat diperoleh dari table Mooran :

Dari temperatur air yang masuk pada boiler $30^{\circ}C$ maka, didapatkan harga entalpi sebesar:

$$h_{inboiler} = 125,77 \frac{kJ}{kg}$$

Dari temperature uap $150^{\circ}C$ dan Tekanan 2 bar yang keluar boiler maka, didapatkan harga entalpi sebesar:

$$h_{outboiler} = 2768,8 \frac{kJ}{kg}$$

Maka sesuai dengan rumus acuan pada 3.1 didapatkan hasil sebagai Kalor yang dibutuhkan oleh *Water Tube Boiler* sebagai berikut :

$$Q_{boiler} = 0,005555 \frac{kg}{s} (2768,8 - 125,79) \frac{kJ}{kg}$$

$$Q_{boiler} = 14682,0316 \frac{J}{s}$$

4.2.2 Perhitungan Bahan Bakar Boiler

Analisis untuk mencari $m_{flue\ gas}$ dan temperatur rata – rata yang diserap oleh air (T_{cm}). Semua data di dapat dari tabel A-4 dan tabel A-6 pada buku “*Fundamentals of Heat and Mass Transfer*” Sevent Edition.

- Dari tabel A-4 (Udara)

$$T_{hm} = \frac{T_s + T_{\infty}}{2}$$

$$T_{hm} = \frac{150 + 400}{2} = 275^{\circ}C = 550^{\circ}K$$

Diperoleh data:

$$C_p = 1040 \frac{J}{kg \cdot ^{\circ}K}$$

$$\mu = 288,4 \times 10^{-7} \frac{N \cdot s}{m^2}$$

$$k = 43,9 \times 10^{-3} \frac{W}{m \cdot ^{\circ}K}$$

$$Pr = 0,683$$

- Dari tabel A-6 (Air)
Asumsi temperature rata – rata (T_{cm}) $\approx 100^{\circ}C = 373^{\circ}K$.
kemudian diperoleh data dari interpolasi sebagai berikut:

$$C_p = 4127 \frac{J}{kg \cdot ^\circ K}$$

$$\mu = 279 \times 10^{-6} \frac{N \cdot s}{m^2}$$

$$k = 680 \times 10^{-3} \frac{W}{m \cdot ^\circ K}$$

$$Pr = 1,76$$

Mencari $\dot{m}_{flue\ gas}$ dengan persamaan dibawah ini:

$$Q_{boiler} = Q_{flue\ gas}$$

$$Q_{flue\ gas} = \dot{m}_{flue\ gas} \cdot C_p \cdot \Delta T$$

$$\dot{m}_{flue\ gas} = \frac{Q_{flue\ gas}}{C_p \cdot \Delta T}$$

$$\dot{m}_{flue\ gas} = \frac{14682,0316\ J/s}{1040\ J/kg \cdot ^\circ K \cdot (400-150)^\circ K}$$

$$\dot{m}_{flue\ gas} = 0,0564 \frac{kg}{s}$$

Setelah $\dot{m}_{flue\ gas}$ ditemukan maka kini harus membuktikan secara aktual temperatur rata – rata yang diserap air dengan temperatur yang diasumsikan, sebagai berikut :

$$Q = \dot{m}_{flue\ gas} \cdot C_p (T_{ci} - T_{co})$$

$$T_{co} = \frac{Q}{\dot{m}_{flue\ gas} \cdot C_p} + T_{ci}$$

$$T_{co} = \frac{14682,0316 \text{ J/s}}{0,0564 \text{ kg/s} \cdot 4,217 \text{ J/kg} \cdot ^\circ\text{K}} + 303^\circ\text{K}$$

$$T_{co} = 365 \text{ } ^\circ\text{K} = 92 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_{cm} = \frac{T_{co} + T_{ci}}{2}$$

$$T_{cm} = \frac{92 \text{ } ^\circ\text{C} + 30 \text{ } ^\circ\text{C}}{2} = 62^\circ\text{C}$$

4.2.3 Pemilihan Jenis Pipa

Jenis pipa yang akan digunakan untuk water tube harus disesuaikan dengan kebutuhan dari perancangan. Disini akan dicari bahan dari pipa yang bisa menahan suhu 150°C dan juga tekanan 2 Bar. Untuk mencari kekuatan dari material maka harus dicari ketebalan yang dibutuhkan pipa untuk dapat menahan tekanan kerja 2 bar. Dari rumus acuan 3.

$$t = \frac{29\text{lb/in} \times 0,22\text{in}}{180\text{lb/in} \times 0,85 - 0,6 \times 29\text{lb/in}}$$

$$t = 0,04724 \text{ in} = 1,2 \text{ mm}$$

Dari perhitungan diatas maka pemilihan pipa yang tersedia di pasaran diambil dengan spesifikasi sebagai berikut:

- * Bahan pipa = Tubing Stainless Steel
- * Diameter Outside = 12,7 mm = 0,0127 m
- * Ketebalan pipa = 1,2 mm
- * Diameter Inside = 11,5 mm = 0,0115 m

4.2.4 Perhitungan Air Mengalir Didalam Pipa

Air yang mengalir didalam pipa akan dihitung untuk menentukan jenis aliran yang mengalir didalam pipa. Maka sesuai dengan rumus acuan pada 3.5 didapatkan hasil sebagai berikut :

$$Re_D = \frac{4.0,005555 \text{ kg/s}}{\pi \cdot 0,011 \text{ m} \cdot 279 \times 10^{-7} \text{ Ns/m}^2}$$

$$Re_D = 2,307.37279$$

Maka kolerasi “ *Convection Internal Flow* “ yaitu:

$$h_i = Nu_D \cdot \frac{k}{D_i}$$

$$h_i = 3,66 \cdot \frac{680 \times 10^{-3} \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{K}}{0,011 \text{ m}}$$

$$h_i = 226,2246 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{K}$$

4.2.5 Perhitungan Udara Mengalir Diluar Pipa

Udara yang mengalir di luar pipa akan dihitung untuk menentukan jenis aliran yang mengalir di luar pipa. Maka sesuai dengan rumus acuan pada 3.6 didapatkan hasil sebagai berikut :

$$Re_D = \frac{4.0,0564 \text{ kg/s}}{\pi \cdot 0,0127 \text{ m} \cdot 288,4 \times 10^{-6} \text{ Ns/m}^2}$$

$$Re_D = 196,173.913$$

Karena aliran turbulen maka kolerasi “ *Convection External Flow* “ menggunakan persamaan :

$Nu_D = C Re_D^m Pr^{1/3} \longrightarrow$ (Data C dan m didapatkan pada tabel persamaan konstanta)

Tabel 4.1 Persamaan Konstanta 1

Re_D	C	m
0,4 - 4	0,989	0,330
4 - 40	0,911	0,385
40 - 4000	0,683	0,466
4000 - 40000	0,193	0,618
40000 - 400000	0,027	0,805

$$Nu_D = 0,027 \cdot 196,173^{0,805} 0,683^{1/3}$$

$$Nu_D = 433,311$$

$$h_o = Nu_D \cdot \frac{k}{D_o}$$

$$h_o = 433,311 \cdot \frac{43,9 \times 10^{-3} W/m \cdot ^\circ K}{0,0127 m}$$

$$h_o = 1473,2573 W/m^2 \cdot ^\circ K$$

4.2.6. Konduksi Yang Terjadi Pada Pipa

Analisis data untuk Stainless Steel yaitu Stainless Steel diperoleh dari tabel A-1 pada buku “*Fundamentals of Heat and Mass Transfer*” Incopera Seventh Edition didapatkan harga $k = 20.0 W/m \cdot ^\circ K$

Nilai k yang sudah didapatkan maka akan dimasukkan pada rumus sesuai acuan pada 3.7 dan akan didapatkan hasil sebagai berikut :

$$U = \frac{0,00635 \text{ m}}{20 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{K}} \ln \frac{0,00635 \text{ m}}{0,00575 \text{ m}}$$

$$= 3,151 \times 10^{-5} \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{K}$$

4.2.7 Koefisien Perpindahan Panas

Setelah mendapatkan nilai konduksi pada pipa maka harus dihitung koefisien perpindahan panasnya. Maka sesuai dengan rumus acuan pada 3.8 didapatkan hasil sebagai berikut :

$$U = \frac{1}{\frac{1}{1,473 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{K}} + 3,151 \times 10^{-5} + \frac{0,00635 \text{ m}}{0,00573 \text{ m}} \cdot \frac{1}{226,2246 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{K}}}$$

$$U = 196.19384 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{K}$$

4.2.5 Dimensi Panjang Pipa

Pipa dianggap pipa baru, sehingga tidak ada *fouling factor* (kerak), maka panjang pipa akan di hitung menggunakan acuan rumus perbandingan yang ada pada 3.9 :

$$\Delta T_{lm} = \frac{(400 - 62)^\circ\text{C} - (150 - 30)^\circ\text{C}}{\ln \left[\frac{(400 - 62)}{(150 - 30)} \right]^\circ\text{C}}$$

$$\Delta T_{lm} = 212^\circ\text{C}$$

Setelah didapatkan hasil dari perbedaan logaritmis temperatur rata – rata, maka akan dihitung Panjang pipa yang dibutuhkan untuk *water tube boiler* nantinya. Sesuai dengan acuan rumus pada 3.10 akan didapatkan hasil sebagai berikut :

$$L = \frac{14682,0316 \text{ J/s}}{196,927 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{K} \cdot \pi \cdot 0,011 \text{ m} \cdot (212 + 273)^\circ\text{K}}$$

$$L = 6,8 \text{ m}$$

Jadi Panjang pipa yang akan digunakan untuk *water tube boiler* adalah sepanjang 6,8 meter.

4.2.6 Efisiensi Water Tube Boiler

Efisiensi terhadap boiler sangat penting untuk dilihat dan juga diperhitungkan dalam pembuatan boiler. Hal ini sangat dibutuhkan agar bahan bakar yang digunakan untuk pemanasan boiler tidak akan terbuang sia – sia dan juga akan digunakan sebagai pemanas dengan baik. Rumus efisiensi boiler

$$\eta_{thermal} = \frac{0,005555 \text{ kg/s} (2768,8 - 125,77) \text{ KJ/kg}}{0,0564 \text{ kg/s} \times 46.607 \text{ KJ/kg}} \times 100\%$$

$$\eta_{thermal} = 0,558 \%$$

4.2.7 Listrik Yang Dihasilkan

h_{in} : Nilai enthalpy yang masuk kedalam turbin didapatkan dari enthalpy suhu yang masuk kedalam turbin berkisar 140°C maka enthalpy yang diambil dari tabel Mooran sebesar = 2768,8 kJ/kg.

h_{out} : Nilai enthalpy yang keluar dari turbin didapatkan dari enthalpy suhu yang keluar dari dalam turbin yaitu berkisar 130°C maka enthalpy yang diambil dari tabel Mooran pada suhu tersebut adalah = 2720,5 kJ/kg

a. Daya Steam Masuk Turbin

$$\begin{aligned}
 W_{Ti} &= m_s \times h_{in} \\
 &= 20 \text{ kg/jam} \times 2768,8 \text{ kJ/kg} \\
 &= 55,376 \text{ kJ/jam} \\
 &= \frac{55,376 \text{ kJ}}{\text{jam}} \cdot 1000 \text{ J} \\
 &= \frac{55376}{3600 \text{ s}} \\
 &= 15,380 \text{ watt}
 \end{aligned}$$

b. Daya Steam Keluar Turbin

$$\begin{aligned}
 W_{To} &= m_s \times h_{out} \\
 &= 20 \text{ kg/jam} \times 2720,5 \text{ kJ/kg} \\
 &= 54,410 \text{ kJ/jam} \\
 &= \frac{54,410 \text{ kJ}}{\text{jam}} \cdot 1000 \text{ J} \\
 &= \frac{54410}{3600 \text{ s}} \\
 &= 15,100 \text{ watt}
 \end{aligned}$$

4.2 Instrumen Penunjang Boiler

Setelah penentuan dimensi dan juga bentuk selesai dikerjakan maka hasil rancangan akan dibuat dalam bentuk nyata. Untuk bisa benar – benar bekerja dengan baik, maka temperatur, tekanan, dan level air yang ada didalam boiler harus dikendalikan. Oleh sebab itu sangat diperlukan pemasangan instrumen pada boiler untuk dapat bekerja dengan baik. Berikut adalah instrumen yang terpasang pada boiler :

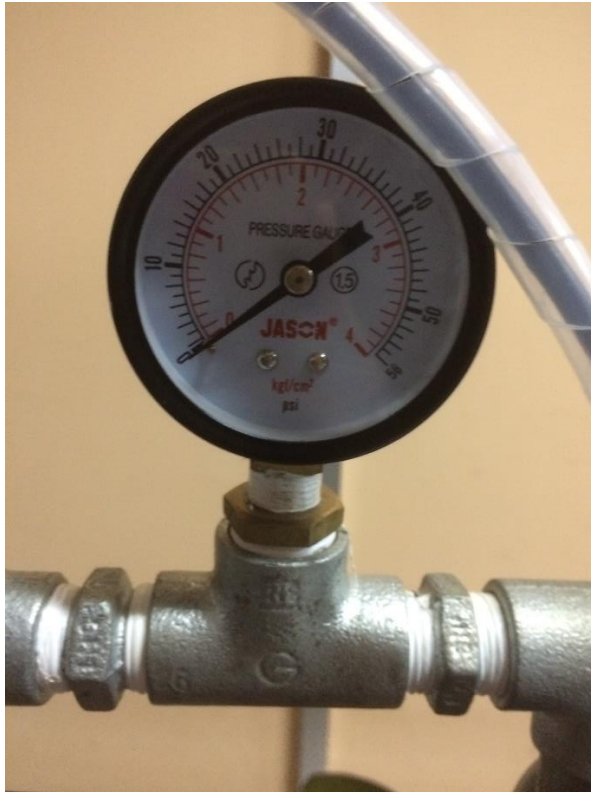
a. Level Glass



Gambar 4.2 *Level Glass*

Level gauge terpasang setinggi *steam drum* yang berada didalam boiler. Level air harus dijaga agar tetap berada pada *set point* yang telah ditentukan, untuk itu level air yang ada didalam *steam drum* harus dapat diketahui dengan benar maka dipasanglah *Level gauge* berfungsi sebagai alat untuk menunjukkan tingginya level air yang ada didalam *steam drum*.

b. Pressure Gauge



Gambar 4.3 Pressure Gauge

Sama halnya seperti fungsi dari *level gauge*, *pressure gauge* disini berfungsi sebagai pendeteksi besarnya tekanan yang ada didalam *boiler*. Tekanan yang dihasilkan oleh *steam* akan terbaca oleh *pressure gauge*. Hal ini dibutuhkan untuk menjaga tekanan yang ada didalam untuk tetap stabil atau tidak terjadi *over pressure*.

c. *Manual Valve*



Gambar 4.4 *Manual Vale*

Manual Valve berfungsi untuk membuat air yang ada di dalam boiler. Air dalam *boiler* akan menjadi kondensat dan didalamnya juga terdapat padatan yang dapat menjadi kerak nantinya. *Manual valve* juga digunakan untuk membuka jalur uap yang akan masuk menuju turbin untuk memutar sudu turbin.

d. *Sensor Thermocouple*

Sensor *thermocouple* yang digunakan adalah sensor *thermocouple type K* dimana sensor ini dipasang didalam *steam drum*. Tujuannya untuk dapat mengetahui suhu yang ada didalam *steam drum*. Seperti halnya sensor *pressure* atau *pressure gauge* yang digunakan untuk mendeteksi tekanan dalam *boiler* untuk menjaga keseimbangan tekanan yang ada didalam *boiler* serta menjaga *set point* tekanan, *thermocouple* juga memiliki fungsi

yang serupa. Dimana sensor akan memunculkan pembacaan temperatur dan hal itu akan berfungsi untuk menjaga temperatur tetap pada *set point*nya.



Gambar 4.5 Sensor *Thermocouple Type K*

4.4 Prinsip Kerja *Water Tube Boiler*

Water tube boiler adalah boiler dimana *flue gas* hasil pembakaran berada diluar pipa dan air berada di dalam pipa, sehingga uap yang dihasilkan berada didalam pipa. Prinsip kerja dari *water tube boiler* yang ada pada steam engine plant ini, yaitu:

1. *Water treatment* dari water tank masuk kedalam *water tube* bagian atas boiler melalui *feedwater pump*.
2. Air yang ada di *water tube* bagian atas terus mengalir menuju *water tube* yang berada dibagian bawa dari steam drum, air akan mengalir memenuhi seluruh bagian pipa hingga masuk kedalam steam drum dan memenuhi batas set point level yaitu 2,5 liter. Sedangkan *flue gas* yang berasal dari *furnace* akan membakar *water tube*. Karena adanya *flue gas* yang mengalir diluar *water tube* dan didalam dinding *water tube* terdapat air, maka panas yang berada didalam boiler sebagian besar diberikan kepada air yang berada didalam pipa. Sehingga, pengaruh dari proses pemanasan air tersebut berubah menjadi uap.

3. Setelah terjadinya perubahan fasa dari air ke uap di dalam boiler, maka uap jenuh tersebut keluar boiler melalui pipa distribusi. Sedangkan sisa *flue gas* yang telah melewati pipa – pipa yang berada didalam boiler diteruskan menuju keatas badan boiler dan kemudian dibuang melalui cerobong.

4.5 Hasil Performansi Perancangan Boiler

Setelah perhitungan dan pemilihan material bagi boiler dilakukan, maka perancangan dari Boilerpun dilakukan. Setelah perancangan selesai dilakukan maka alat akan di jalankan untuk melihat performa apakah sesuai dengan desain yang telah di buat. Dari hasil running alat yang dilakukan, didapatkan hasil seperti berikut :

Tabel 4.2 Data Kalor Yang Dihasilkan Pembakaran

Waktu (sekon)	Suhu Api (°C)	Suhu Air (°C)	Pembukaan Valve	Kalor Api (J)
0	37	30	40%	50159.92
2	73	45	40%	50159.92
4	105	56	40%	50159.92
6	140	67	80%	100319.84
8	187	72	80%	100319.84
10	223	80	80%	100319.84
12	251	98	100%	150479.76
14	294	109	100%	150479.76
16	339	116	100%	150479.76
18	398	129	100%	150479.76
20	403	134	10%	100319.84
				1103518.24

Tabel diatas menunjukkan tentang hasil kalo yang dilepaskan oleh pembakaran gas LPG yang digunakan sebagai bahan bakar dari boiler yang telah dirancang. Dan pembukaan dari valve akan mempengaruhi laju flue gas dan juga besarnya pembakaran yang terjadi didalam burner. Hal itu akan mempengaruhi kalo yang dihasilkan. Dapat dilihat dari tabel bahwa disaat suhu berkisar dari 0°C hingga 60°C maka pembukaan valve sebesar 40% lalu disaat suhu menyentuh 80°C maka pembukaan dari valve akan naik menjadi 80% dan disaat suhu melebihi 80°C maka valve akan 100% terbuka. Pembukaan valve akan terus terjaga hingga suhu mencapai 130°C dan saat suhu menyentuh angka lebih dari 130 maka valve akan menutup setiap 10% hingga suhu kembali berada pada 130 atau dibawahnya dan bila suhu berada dibawah 130 maka valve akan kembali terbuka menuju 100% untuk menjaga kondisi stady state.

Tabel 4.4 Data Input Boiler

Input				
Volume Air (liter)	Temperature Api (°C)	Temperature (°C)	Pressure (Kpa)	Waktu (m)
3,7	37	30	4	0
3,7	73	30	4	2
3,7	105	30	4	4
3,7	140	30	4	6
3,7	187	30	4	8
3,7	223	30	4	10
3,7	251	30	4	12
3,7	294	30	4	14
3,7	339	30	4	16

4.4 Data Input Boiler (Lanjutan)

3,7	398	30	4	18
3,7	403	30	4	20

Tabel 4.3 Data Output Boiler

Output				
Waktu	Pressure (Kpa)	Temperature (°C)	Kalor (J)	Jenis
0 Menit	4	30	37,800	Air
2 Menit	7	45	113,400	Air
4 Menit	12	56	141,120	Air
6 Menit	17	67	168,840	Air
8 Menit	25	72	181,440	Air
10 Menit	31	80	201,600	Air
12 Menit	74	98	246,960	Uap Jenuh
14 Menit	95	109	274,680	Uap Jenuh
16 Menit	150	116	292,320	Uap Jenuh
18 Menit	190	129	317,520	Uap Jenuh
20 Menit	272	134	337,680	Uap Jenuh
			2,313,360	

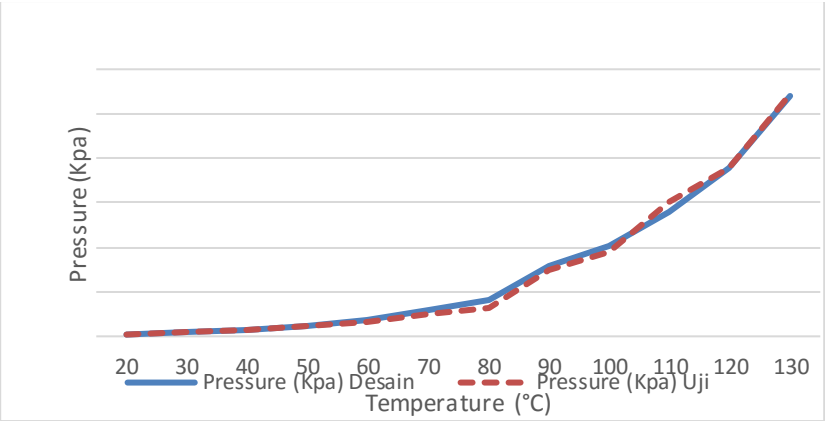
Kedua tabel diatas menunjukkan antara Input yang masuk kedalam boiler dan juga output yang keluar dari dalam boiler. Dimana tertera volume air yang ada didalam seluruh tubing dan steam drum berkisar antara 3,7 liter masuk kedalam boiler. Air itu akan dipanaskan dengan api bersuhu hingga 403°C akan menghasilkan steam dengan tekanan hingga 272 Kpa dan temperature yang mencapai 134°C dengan kalor yang dihasilkan

sebesar 337,680 Joule dan menghasilkan jenis steam yaitu uap jenuh yang berkisat antara 100-150°C.

Tabel 4.4 Data Perbandingan Pressure

Temperature (°C)	Pressure (Kpa) Desain	Pressure (Kpa) Uji	Error
20	2	2	0%
30	4	4	0%
40	7	7	0%
50	12	11	1%
60	19	17	2%
70	30	25	5%
80	40	31	9%
90	80	74	6%
100	101	95	6%
110	140	150	10%
120	190	190	0%
130	270	272	2

Tabel diatas menunjukkan tentang perbandingan tekanan yang ada pada ketentuan desain dan juga hasil dari uji performa yang telah dilakukan. Dapat terlihat bagaimana temperatur dapat mempengaruhi perubahan dari tekanan yang dihasilkan oleh uap. Dari perbandingan tabel diatas dapat dibuat grafik sebagai berikut :



Gambar 4.5 Grafik Perbandingan Tekanan Desain dan Uji

Dari grafik yang ada diatas bisa dilihat bahwa tekanan pada data desain yang didapatkan tidak berbeda jauh dari data hasil uji tekanan yang telah didapatkan. Ada beberapa perbedaan pada titik namun perbedaan itu tidak begitu besar, dimana bisa di simpulkan bahwa tekanan desain sesuai dengan tekanan hasil pengujian perfoma dari boiler.

Tabel 4.5 Perbandingan Uji Performa Pada Temperatur

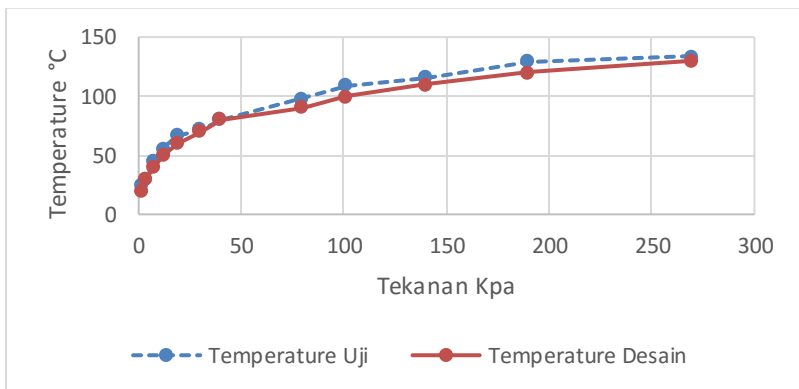
Data Pengujian Temperatur		
Pressure (Kpa) Desain	Temperature Uji (°C)	Temperature Desain (°C)
2	24	20
4	30	30
7	45	40
12	56	50
19	67	60
30	72	70
40	80	80

4.5 Data Perbandingan (Lanjutan)

80	98	90
101	109	100
140	116	110
190	129	120
270	134	130

Tabel diatas menunjukkan tentang perbandingan tekanan yang ada pada ketentuan desain dan juga hasil dari uji performa yang telah dilakukan. Dari gambar grafik yang telah dihasilkan dari perbandingan data yang ada bisa dilihat bahwa kenaikan suhu dari hasil pengujian sebanding dengan suhu desain yang dihasilkan dari besarnya tekanan.

Dari hasil grafik juga dapat ditarik sebuah kesimpulan bahwa kenaikan temperature dan pressure yang dihasilkan sebanding atau beriringan dengan ketentuan perancangan dan set point yang telah dibuat.



Gambar 4.5 Grafik Perbandingan Temperatur Desain dan Uji

4.6 Pembahasan

Pada tugas akhir design perancangan boiler ini digunakan perhitungan perpindahan panas dari boiler sebagai acuan penentuan material dan Panjang tubing yang dibutuhkan. Serta beberapa data yang ditentukan untuk menjadi acuan perhitungan perpindahan panas yang nantinya akan terjadi pada boiler serta menjadi acuan desain boiler sendiri.

Boiler yang akan dirancang adalah tipe *Vertical Water Tube Boiler* dimana air yang akan diubah menjadi steam terletak pada sisi dalam tubing dan api yang berada disisi luar tubing. Dari hasil perhitungan yang diperoleh didapatkan material yang digunakan adalah Stainless Steel dengan diameter luar 12,7 mm dan diameter dalam sebesar 11,5 mm dengan ketebalan 1,2 mm. Tekanan operasi yang dihasilkan adalah 2 Bar dengan suhu steam berkisar 100 hingga 150 °C.

Setelah perancangan dan pembuatan selesai dilakukan, maka boiler yang telah dirancang akan diuji apakah performasinya akan sesuai dengan desain yang telah dibuat. Dan dari pengujian yang telah dilakukan, didapatkan data pengukuran untuk range temperature dari air dengan suhu 20 hingga mulai menjadi uap dengan suhu 130 apakah tekanan yang dihasilkan sesuai dengan data perancangan. Dari data dihasilkan sesuai dengan tabel 4.3 bahwa tekanan yang dihasilkan sesuai set point temperature tidak berbeda jauh dengan data desain yang telah ada.

Dan penentuan kapasitas untuk desain sesuai dengan kapasitas listrik yang diperlukan. Dimana PLTU ini nanti akan menghasilkan steam yang dapat memutar turbin untuk menyalakan lampu sebesar 5 watt, dan dari kapasitas 20kg/jam

dengan suhu 130 dan tekanan 200 Kpa dapat menghasilkan listrik sebesar 5 watt setiap detiknya.

Selain itu juga dipasang *instrument* pada *boiler* sebagai penunjang dalam kerja boiler. Pesangan *instrument* seperti *valve*, *sensor*, *level gauge* dan *pressure gauge* di maksudkan untuk bisa mengendalikan temperatur, tekanan dan juga *level* yang ada didalam *boiler*. Dimana semua itu harus dijaga agar tetap sesuai dengan *set point* yang di inginkan. Dan juga menjaga keamanan dari *boiler* agar tidak terjadi *over pressure* pada jalur steam yang dihasilkan dan juga temperatur tidak melebihi dari *set point* yang diharuskan serta *level* yang tidak melebihi *set point* agar tidak terjadi *carry over* pada lajur *steam*.

Halaman Sengaja Dikosongi

BAB V PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Dari hasil analisa perhitungan - perhitungan yang telah dilakukan maka:

1. Boiler yang dirancang adalah Boiler berjenis *Vertical Water Tube*. Dimana prinsip kerjanya adalah air mengalir didalam pipa kemudian dipanaskan oleh api yang berasal dari ruang pembakaran.
2. Dari hasil perhitungan didapatkan total panjang pipa sebesar 6,8 m, bahan yang digunakan adalah stainless steel dengan diameter luar 12,7 mm, diameter dalam 11,5 mm dengan ketebalan 1,2 mm.
3. Berdasarkan perhitungan desain yang dilakukan dengan alat yang sudah dijalankan, mendapatkan hasil yang sesuai dengan performa. Pressure steam yang dihasilkan pada temperature berkisar 100-150 adalah 0-200 Kpa. Sesuai dengan design yang di tentukan.

5.2 Saran

Pada analisis perhitungan dan perencanaan water tube boiler ini masih banyak hal yang perlu disempurnakan oleh analisis – analisis selanjutnya. Oleh karena itu diberikan saran – saran sebagai berikut :

1. Untuk perancangan selanjutnya disarankan untuk menggunakan kompor high pressure agar panas steam yang dihasilkan akan lebih bagus dan juga pembakaran akan lebih sempurna sehingga tidak akan terjadi losses yang banyak saat pembakaran terjadi.
2. Perlu ditetapkannya *timeline* dari awal pengerjaan sampai akhir dan kesepakatan dari masing-masing anggota kelompok mengenai *timeline* tersebut sehingga pengerjaan alat berjalan sesuai dengan *timeline*.

Perencanaan dan perancangan yang lebih matang dengan mengacu pada referensi – referensi nasional maupun internasional.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] ASME Section IV : Heating Boilers
- [2] Effendy, Dwi A. 2013 “Rancang Bangun Boiler Untuk Proses Pemanasan Sistem Uap Pada Industri Tahu Dengan Menggunakan Catia V5” Semarang.
- [3] Incropera, Frank P. 2011 “Fundamental Of Heat And Mass Transfer seventh edition ”. New York : Jhon wiley & sons, Inc.
- [4] Luo Chao, Luo Ke, Wang Youngzhen, Ma Zhitong, and Gong Yulie. 2017. “The Effect of Analysis of Thermal Efficiency and Optimal Design for Boiler System.”
- [5] Muin, Syamsir A. 1988. *Pesawat-Pesawat Konversi Energi I (Ketel Uap)*. Jakarta: Rajawali Pers.
- [6] Purna Irawan, Agustinus. “Diktat Elemen Mesin” Universitas Tarumanagara. 2009
- [7] Sarsetyanto, Joko. “Diktat Perpindahan Panas” Surabaya : D3 Teknik Mesin ITS.
- [8] Raharjo W. D dan Karnowo. 2008. *Mesin Konversi Energi*. Semarang : Universitas Negeri Semarang Press.
- [9] Rusnoto. 2008. *Perencanaan Ketel Uap Tekanan 6 Atm dengan Bahan Bakar Kayu untuk Industri Sederhana*. Oseatek, Edisi 4. Hal 32-35.
- [10] Singer F.L dan A. Pytel. 1985. *Kekuatan Bahan (Teori Kokoh – Strenght of Materials)*. Jakarta : Erlangga.

Lampiran 1 Tabel Thermo Material 1

TABLE A.1 Thermophysical Properties of Selected Metallic Solids^a

Composition	Melting Point (K)	Properties at 300 K				Properties at Various Temperatures (K)									
		ρ (kg/m ³)	c_p (J/kg · K)	k (W/m · K)	$\alpha \cdot 10^6$ (m ² /s)		200	400	600	800	1000	1200	1500	2000	2500
Aluminum Pure	933	2702	903	237	97.1	302	237	240	231	218					
Alloy 2024-T6 (4.5% Cu, 1.5% Mg, 0.6% Mn)	775	2770	875	177	73.0	65	163	186	186	1146					
Alloy 195, Cast (4.5% Cu)	1550	1850	1825	200	59.2	990	301	161	126	106	90.8	78.7			
Beryllium	1550	1850	1825	200	59.2	203	1114	2191	2604	2823	3018	3227	3519		
Bismuth	545	9780	122	7.86	6.59	16.5	9.69	7.04							
Boron	2573	2500	1107	27.0	9.76	190	55.5	16.8	10.6	9.60	9.85				
Cadmium	594	8650	231	96.8	48.4	203	99.3	94.7	1892	2160	2338				
Chromium	2118	7160	449	93.7	29.1	159	111	90.9	80.7	71.3	65.4	61.9	57.2	49.4	
Cobalt	1769	8862	421	99.2	26.6	167	122	85.4	67.4	58.2	52.1	49.3	42.5		
Copper	1358	8933	385	401	117	482	413	393	379	366	352	339			
Commercial bronze (90% Cu, 10% Al)	1293	8800	420	52	14	252	356	397	417	433	451	480			
Phosphor gear bronze (89% Cu, 11% Sn)	1104	8780	355	54	17		785	460	545						
Cartridge brass (70% Cu, 30% Zn)	1188	8530	380	110	33.9	75	95	137	149	D	D	D			
Constantan (55% Cu, 45% Ni)	1493	8920	384	23	6.71	17	19	360	395	425					
Germanium	1211	5360	322	59.9	34.7	237	362	43.2	27.3	19.8	17.4	17.4			
						190	290	337	348	357	375	395			

Lampiran 2 Tabel Thermo Material 2

TABLE A.1 Continued

Composition	Melting Point (K)	Properties at 300 K			Properties at Various Temperatures (K)										
		ρ (kg·m ⁻³)	c_p (J/kg·K)	k (W/m·K)	$\alpha \cdot 10^8$ (m ² /s)	100	200	400	600	800	1000	1200	1500	2000	2500
Gold	1336	19300	129	317	127	327	323	311	298	284	270	255			
						109	124	131	135	140	145	155			
Iridium	2720	22500	130	147	50.3	172	153	144	138	132	126	120	111		
						90	122	133	138	144	153	161	172		
Iron															
Pure	1810	7870	447	80.2	23.1	134	94.0	69.5	54.7	43.3	32.8	28.3	32.1		
						216	384	490	574	680	975	609	654		
Armco (99.75% pure)		7870	447	72.7	20.7	95.6	80.6	65.7	53.1	42.2	32.3	28.7	31.4		
						215	384	490	574	680	975	609	654		
Carbon steels															
Plain carbon (Mn \leq 1%, Si \leq 0.1%)		7854	434	60.5	17.7			56.7	48.0	39.2	30.0				
								487	559	685	1169				
AISI 1010		7832	434	63.9	18.8			58.7	48.8	39.2	31.3				
								487	559	685	1168				
Carbon-silicon (Mn \leq 1%, 0.1% < Si \leq 0.6%)		7817	446	51.9	14.9			49.8	44.0	37.4	29.3				
Carbon-manganese-silicon (1% < Mn \leq 1.65%, 0.1% < Si \leq 0.6%)		8131	434	41.0	11.6			501	582	699	971				
								42.2	39.7	35.0	27.6				
								487	559	685	1090				
Chromium (low) steels															
1/2Cr-1/2Mo-1/2Si (0.18% C, 0.65% Cr, 0.23% Mo, 0.6% Si)		7822	444	37.7	10.9			38.2	36.7	33.3	26.9				
								492	575	688	969				
1Cr-1/2Mo (0.16% C, 1% Cr, 0.54% Mo, 0.39% Si)		7858	442	42.3	12.2			42.0	39.1	34.5	27.4				
								492	575	688	969				
1Cr-1/2V (0.2% C, 1.02% Cr, 0.15% V)		7836	443	48.9	14.1			46.8	42.1	36.3	28.2				
								492	575	688	969				

[illegible]

Lampiran 4 Tabel Steam 1

TABLE B.1 Saturated Water: Temperature Table

2

T °C	P kPa, MPa	\hat{v}_l m ³ /kg	\hat{v}_g m ³ /kg	\hat{u}_l kJ/kg	$\Delta \hat{u}_{fg}$ kJ/kg	\hat{u}_g kJ/kg	\hat{h}_l kJ/kg	$\Delta \hat{h}_{fg}$ kJ/kg	\hat{h}_g kJ/kg	\hat{s}_l kJ/kg K	$\Delta \hat{s}_{fg}$ kJ/kg K	\hat{s}_g kJ/kg K
0.01	0.6113	0.001000	206.132	0.00	2375.3	2375.3	0.00	2501.3	2501.3	0.0000	9.1562	9.1562
5	0.8721	0.001000	147.118	20.97	2361.3	2382.2	20.98	2489.6	2510.5	0.0761	8.9496	9.0257
10	1.2276	0.001000	106.377	41.99	2347.2	2389.2	41.99	2477.7	2519.7	0.1510	8.7498	8.9007
15	1.7051	0.001001	77.925	62.98	2333.1	2396.0	62.98	2465.9	2528.9	0.2245	8.5569	8.7813
20	2.3385	0.001002	57.790	83.94	2319.0	2402.9	83.94	2454.1	2538.1	0.2966	8.3706	8.6671
25	3.1691	0.001003	43.359	104.86	2304.9	2409.8	104.87	2442.3	2547.2	0.3673	8.1905	8.5579
30	4.2461	0.001004	32.893	125.77	2290.8	2416.6	125.77	2430.5	2556.2	0.4369	8.0164	8.4533
35	5.6290	0.001006	25.216	146.65	2276.7	2423.4	146.66	2418.6	2565.3	0.5052	7.8478	8.3530
40	7.3837	0.001008	19.523	167.53	2262.6	2430.1	167.54	2406.7	2574.3	0.5724	7.6945	8.2569
45	9.5934	0.001010	15.258	188.41	2248.4	2436.8	188.42	2394.8	2583.2	0.6386	7.5261	8.1647
50	12.350	0.001012	12.032	209.30	2234.2	2443.5	209.31	2382.7	2592.1	0.7037	7.3725	8.0762
55	15.758	0.001015	9.568	230.19	2219.9	2450.1	230.20	2370.7	2600.9	0.7679	7.2234	7.9912
60	19.941	0.001017	7.671	251.09	2205.5	2456.6	251.11	2358.5	2609.6	0.8311	7.0784	7.9095
65	25.033	0.001020	6.197	272.00	2191.1	2463.1	272.03	2346.2	2618.2	0.8934	6.9375	7.8309
70	31.188	0.001023	5.042	292.93	2176.6	2469.5	292.96	2333.8	2626.8	0.9548	6.8004	7.7552
75	38.578	0.001026	4.131	313.87	2162.0	2475.9	313.91	2321.4	2635.3	1.0154	6.6670	7.6824
80	47.390	0.001029	3.407	334.84	2147.4	2482.2	334.88	2308.8	2643.7	1.0752	6.5369	7.6121
85	57.834	0.001032	2.828	355.82	2132.6	2488.4	355.88	2296.0	2651.9	1.1342	6.4102	7.5444
90	70.139	0.001036	2.361	376.82	2117.7	2494.5	376.90	2283.2	2660.1	1.1924	6.2866	7.4790
95	84.554	0.001040	1.982	397.86	2102.7	2500.6	397.94	2270.2	2668.1	1.2500	6.1659	7.4158
100	0.10135	0.001044	1.6729	418.91	2087.6	2506.5	419.02	2257.0	2676.0	1.3068	6.0480	7.3548
105	0.12082	0.001047	1.4194	440.00	2072.3	2512.3	440.13	2243.7	2683.8	1.3629	5.9328	7.2958

Lampiran 5 Tabel Steam 2

$P = 200 \text{ kPa}$					
T $^{\circ}\text{C}$	\hat{v} m^3/kg	\hat{u} kJ/kg	\hat{h} kJ/kg	\hat{s} kJ/kg K	
sat	0.88573	2520.5	2706.6	7.1271	
150	0.95664	2576.9	2768.8	7.2795	
200	1.08034	2654.4	2870.5	7.5066	
250	1.19880	2731.2	2971.0	7.7065	
300	1.31616	2808.6	3071.8	7.8926	
400	1.54930	2966.7	3276.5	8.2217	
500	1.78139	3130.7	3487.0	8.5132	
600	2.01297	3301.4	3704.0	8.7760	
700	2.24426	3478.8	3927.7	9.0194	
800	2.47539	3663.2	4158.3	9.2450	
900	2.70643	3854.5	4395.8	9.4565	
1000	2.93740	4052.5	4640.0	9.6563	
1100	3.16834	4257.0	4890.7	9.8458	
1200	3.39927	4467.5	5147.3	10.0262	
1300	3.63018	4683.2	5409.3	10.1982	

$P = 300 \text{ kPa}$					
T $^{\circ}\text{C}$	\hat{v} m^3/kg	\hat{u} kJ/kg	\hat{h} kJ/kg	\hat{s} kJ/kg K	
sat	0.60582	2543.6	2725.3	6.9918	
150	0.63388	2570.8	2761.0	7.0778	
200	0.71629	2650.7	2863.5	7.3115	
250	0.79636	2728.7	2967.6	7.5165	
300	0.87529	2806.7	3069.3	7.7022	
400	1.03151	2963.5	3275.0	8.0329	
500	1.18689	3130.0	3486.0	8.3250	
600	1.34136	3300.8	3703.2	8.5892	
700	1.49573	3478.4	3927.1	8.8319	
800	1.64994	3662.9	4157.8	9.0575	
900	1.80406	3854.2	4395.4	9.2691	
1000	1.95812	4052.3	4639.7	9.4689	
1100	2.11214	4256.8	4890.4	9.6585	
1200	2.26614	4467.2	5147.1	9.8389	
1300	2.42013	4683.0	5409.0	10.0109	

$P = 400 \text{ kPa}$					
T $^{\circ}\text{C}$	\hat{v} m^3/kg	\hat{u} kJ/kg	\hat{h} kJ/kg	\hat{s} kJ/kg K	
sat	0.46246	2553.6	2738.5	6.8658	
150	0.47084	2564.5	2752.8	6.9200	
200	0.53492	2646.8	2860.5	7.1706	
250	0.58512	2726.1	2964.2	7.3788	
300	0.63484	2804.8	3066.7	7.5661	
400	0.77262	2964.4	3273.4	7.8994	
500	0.89034	3120.2	3484.9	8.1912	
600	1.00555	3300.2	3702.4	8.4557	
700	1.12147	3477.9	3926.5	8.6987	
800	1.23722	3662.5	4157.4	8.9244	
900	1.35288	3853.9	4395.1	9.1361	
1000	1.46847	4052.0	4639.4	9.3360	
1100	1.58404	4256.5	4890.1	9.5255	
1200	1.69958	4467.0	5146.8	9.7059	
1300	1.81511	4682.8	5408.8	9.8790	

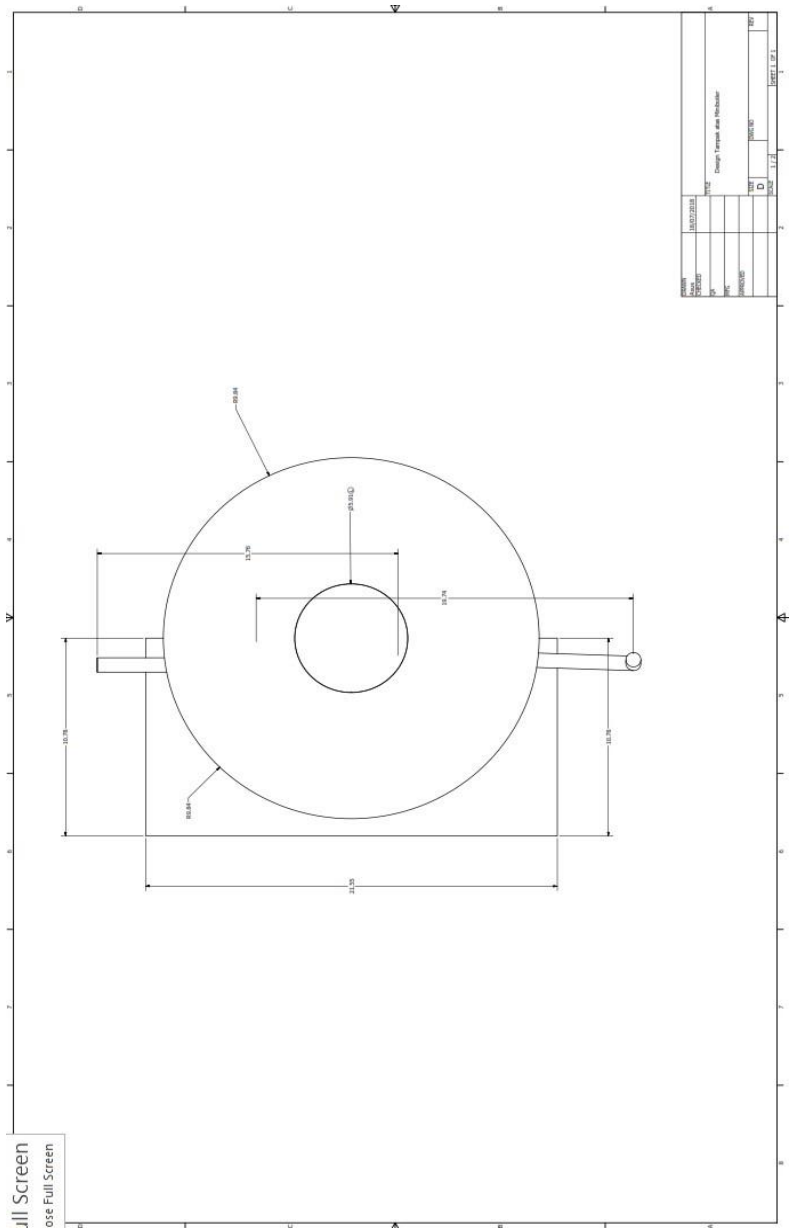
Lampiran 6 Tabel *Thermophysical Properties of Gases*

TABLE A.4 Thermophysical Properties
of Gases at Atmospheric Pressure^a

T (K)	ρ (kg/m ³)	c_p (kJ/kg · K)	$\mu \cdot 10^7$ (N · s/m ²)	$\nu \cdot 10^6$ (m ² /s)	$k \cdot 10^3$ (W/m · K)	$\alpha \cdot 10^6$ (m ² /s)	Pr
Air, $M = 28.97$ kg/kmol							
100	3.5562	1.032	71.1	2.00	9.34	2.54	0.786
150	2.3364	1.012	103.4	4.426	13.8	5.84	0.758
200	1.7458	1.007	132.5	7.590	18.1	10.3	0.737
250	1.3947	1.006	159.6	11.44	22.3	15.9	0.720
300	1.1614	1.007	184.6	15.89	26.3	22.5	0.707
350	0.9950	1.009	208.2	20.92	30.0	29.9	0.700
400	0.8711	1.014	230.1	26.41	33.8	38.3	0.690
450	0.7740	1.021	250.7	32.39	37.3	47.2	0.686
500	0.6964	1.030	270.1	38.79	40.7	56.7	0.684
550	0.6329	1.040	288.4	45.57	43.9	66.7	0.683
600	0.5804	1.051	305.8	52.69	46.9	76.9	0.685
650	0.5356	1.063	322.5	60.21	49.7	87.3	0.690
700	0.4975	1.075	338.8	68.10	52.4	98.0	0.695
750	0.4643	1.087	354.6	76.37	54.9	109	0.702
800	0.4354	1.099	369.8	84.93	57.3	120	0.709
850	0.4097	1.110	384.3	93.80	59.6	131	0.716
900	0.3868	1.121	398.1	102.9	62.0	143	0.720
950	0.3666	1.131	411.3	112.2	64.3	155	0.723
1000	0.3482	1.141	424.4	121.9	66.7	168	0.726
1100	0.3166	1.159	449.0	141.8	71.5	195	0.728
1200	0.2902	1.175	473.0	162.9	76.3	224	0.728
1300	0.2679	1.189	496.0	185.1	82	257	0.719

[illegible]

LAMPIRAN 8 Desain 2 Dimensi *Boiler* (Nampak Atas)



BIODATA PENULIS



Penulis dilahirkan di Kabupaten Sragen, Jawa Tengah pada tanggal 23 Mei 1996 dari ayah yang bernama Gunawan dan Ibu bernama Dwi Siti Noer Hidayati. Penulis merupakan anak kedua dari dua bersaudara. Saat ini penulis tinggal di Rumah Dinas TNI Angkatan Laut Blok A No 5 Kecamatan Kenjeran, Kota Surabaya. Pada tahun 2009, penulis menyelesaikan pendidikannya di SDN Mojo Sragen. Kemudian pada tahun 2012, telah menyelesaikan pendidikan tingkat menengah pertama di SMPN 5 Sragen. Tahun 2015 berhasil menyelesaikan pendidikan tingkat menengah atas di SMAN 1 Sragen dan melanjutkan studi di Departemen Teknik Instrumentasi FV-ITS. Pada bulan Juli 2018 penulis telah menyelesaikan Tugas Akhir dengan judul **“Perancangan Desain Boiler Pada Mini Plant Steam Engine Untuk Pembangkit Listrik Tenaga Uap”**. Bagi pembaca yang memiliki kritik, saran atau ingin berdiskusi lebih lanjut mengenai Tugas Akhir ini maka dapat menghubungi penulis melalui email : kartikarardinata@gmail.com